

2014

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COIMBRA

Análise do comportamento do equipamento de MT em postos de transformação, sob condições de temperatura e humidade desfavoráveis

MESTRADO EM AUTOMAÇÃO E COMUNICAÇÕES EM SISTEMAS DE ENERGIA

AUTOR | Francisco Barroso

ORIENTADORES |

Prof. Doutor Adelino Jorge Pereira

Prof.^a Doutora Rita Monteiro Pereira.

Coimbra, setembro 2014

Instituto Politécnico de Coimbra

INSTITUTO SUPERIOR de ENGENHARIA de COIMBRA

Departamento
de Engenharia Eletrotécnica

Análise do comportamento do equipamento de MT em postos de transformação, sob condições de temperatura e humidade desfavoráveis

Relatório de estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em
Automação e Comunicações em Sistemas de Energia

Autor

Francisco Manuel Lopes Barroso

Orientadores

Prof. Doutor Adelino Jorge Pereira

Prof^ª. Doutora Rita Monteiro Pereira

Instituto Superior Engenharia Coimbra

Supervisor

Eng.º Telmo Ricardo Santiago Ramos

EDP Distribuição

Coimbra, setembro 2014

Trabalho realizado numa parceria entre:



Dedicatória

Aos meus pais.

Agradecimentos

O autor reconhece que, sem a participação de um grupo de pessoas, cada uma com o seu saber, disponibilidade e incentivo, não seria possível a realização deste trabalho.

É com muita honra, que manifesto o meu sincero agradecimento e gratidão a todos pelo apoio e muito particularmente:

- Ao Professor Doutor Adelino Pereira, pelo entusiasmo que demonstrou, apoio e disponibilidade para a realização deste trabalho.
- À Professora Doutora Rita Monteiro, pela confiança e sugestões importantes para este trabalho.
- Ao Engenheiro António Sanches, que contribui-o para a viabilidade deste projeto.
- Ao Engenheiro Telmo Santiago, pela supervisão e assertividade ao longo do desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Engenheiro Rui Lourenço, pela participação no desenvolvimento dos equipamentos utilizados neste trabalho.
- À EDP Distribuição, pelas facilidades concedidas para que o trabalho se pudesse realizar.
- Ao Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, por ter proporcionado a realização deste meu projeto.
- Aos meus familiares, pelo apoio e estímulo dado a este projeto, especialmente à Manuela Santos.

Resumo

Este trabalho foi realizado em ambiente de estágio numa cooperação entre a EDP Distribuição e o Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

O tema da ventilação nos postos de transformação MT/BT assenta no princípio empírico generalizado de que quanto mais ventilação existir melhor será para o seu desempenho.

Este trabalho realizado com base numa investigação, correlaciona a ventilação com as variações de temperatura e humidade que ocorrem no interior dos postos de transformação, do tipo cabina e a forma como estas grandezas podem influenciar a durabilidade do equipamento de média tensão com isolamento de corte no ar.

A análise dos aspetos construtivos da cabina, a sua orientação e envolvente exterior, a influência do posicionamento das aberturas e da performance da ventilação no seu interior, as características dos equipamentos existentes e a quantidade de calor gerado no interior da cabina são fatores que contribuem para as variações da temperatura e humidade alcançadas no seu interior.

A aplicação do modelo matemático permite o cálculo da potência de dissipação do transformador e do caudal de ar necessário para a sua refrigeração, podendo-se desta forma determinar um valor apropriado para a regulação da ventilação. A capacidade de regulação, dimensionada para o regime de carga médio, permite atingir um valor de temperatura mais estável e independente das variações registadas no exterior da cabina.

A capacidade de se poder identificar os postos de transformação a funcionar com baixos valores de carga e a possibilidade de implementar soluções práticas de melhoria de baixo custo com base no cálculo teórico, traduzem-se em melhorias significativas no funcionamento dos postos de transformação.

Palavras chave:

Carga, Equipamento de MT, Postos de transformação, Regulação, Ventilação.

Abstract

This work was fulfilled in an cooperation stage environment between EDP Distribuição and Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

The ventilation subject matter in Secondary Substation MV/LV is based on the widespread of empirical principle that as more ventilation exists, the better for its performance.

This work preformed based in an investigation, correlate the ventilation with the temperature and humidity variations inside of Secondary Substation, cabin type, and how this magnitude can influence the durability of MV equipment with insulation air circuit breaker.

The analysis of cabin construction shape, the orientation and exterior surrounding, the influence of openings position and interior ventilation performance, the characteristics of existing equipment and the generated heat amount in its interior are factors that contribute for temperature and humidity variations attained in cabin interior.

The mathematical model applied allows the transformer dissipation power calculations and the necessary refrigeration air flow and can be establish an appropriated value for ventilation regulation. The regulation capacity, design for medium load regime, allows reach a more stable temperature value and variations recorded outside the cabin independent.

The Secondary Substation identification capacity with charge load low values and the possibility to implement improvement practical solutions with low cost investment, based on theoretical calculation, translate into significant improvements in Secondary Substations good running.

Key words:

Equipment of MV, Load, Regulation, Secondary Substations, Ventilation.

Índice

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações gerais	1
1.2 - Objetivos do trabalho	3
1.3 - Organização e estrutura do trabalho	3

CAPÍTULO 2 - EDP DISTRIBUIÇÃO

2.1 - Considerações gerais	5
2.2 - Caracterização da Direção de Rede e Clientes Tejo	5
2.3 - Área Operacional de Leiria	9
2.4 - Aspetos técnicos	11

CAPÍTULO 3 - POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO

3.1 - Considerações gerais	13
3.2 - Características dos postos de transformação	15
3.2.1 – Aspetos construtivos	15
3.2.2 - Aberturas de ventilação	16
3.2.3 – Aspetos térmicos	17
3.3 - Orientação geográfica e influências climáticas	18
3.4 - Transformadores de potência	20
3.4.1 - Tipos de transformadores	20
3.4.2 - Perdas e rendimento no transformador	20
3.4.2.1 - Perdas por efeito de Joule	21
3.4.2.2 - Perdas no ferro	22
3.4.2.3 - Perdas por dispersão magnética	24
3.4.2.4 - Rendimento do transformador	24
3.5 - Mecanismo de transferência de calor	27
3.5.1 – Por condução	27
3.5.2 – Por convecção	28
3.5.3 – Por radiação	28
3.6 - Transferência de calor no transformador	29

3.7 - Dissipação de calor do transformador	30
3.8 - Normas de serviço dos transformadores	31
3.9 - Seleção dos postos de transformação	33
3.10 - Equipamento de monitorização	34
3.10.1 - Monitorização de curto e longo prazo	34
3.10.2 - Características dos equipamentos de medida	35
3.10.3 - Localização dos equipamentos de medida	37

CAPÍTULO 4 - VENTILAÇÃO NATURAL, TEMPERATURA E HUMIDADE NOS POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO

4.1 - Considerações gerais	39
4.2 - Tipos de ventilação	40
4.3 - Ventilação natural	40
4.3.1 - Ventilação devido ao efeito de chaminé ou Buoyancy	40
4.3.2 - Ventilação devido ao efeito do vento	45
4.3.3 - Ventilação devido à combinação do vento e Buoyancy	50
4.4 - Dissipação de calor por condução e transferência na cabina	52
4.5 - Efeitos da temperatura e humidade	54
4.5.1 - Relação entre temperatura e humidade relativa	54
4.5.2 - Influência da humidade no equipamento de média tensão	57
4.5.3 - Descargas parciais	58
4.5.4 - Poluição e sujidade	60
4.6 - Cabinas pré-fabricadas	61
4.7 - Normas de serviço das cabinas	64

CAPÍTULO 5 - ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NO PERÍODO DE INVERNO E VERÃO

5.1 - Considerações gerais	65
5.2 - Análise do período de inverno	65
5.2.1 - Análise de uma semana de inverno com carga real	65
5.2.2 - Análise do efeito do vento	67
5.2.3 - Análise do efeito do vento e Buoyancy	68
5.2.4 - Simulação de aumento de carga nos transformadores no inverno	69
5.2.5 - Simulação com transformador de potência de 630 kVA no inverno	72

5.3 - Análise do período de verão	75
5.3.1 - Análise de uma semana de verão com carga real	75
5.3.2 - Simulação de aumento de carga nos transformadores no verão	76
5.3.3 - Simulação com transformador de potência de 630 kVA no verão	79
5.4 - Ventilação em postos de transformação de cabina alta	82
5.5 – Síntese	84
 CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	
6.1 - Conclusões	85
6.2 - Propostas de futuros desenvolvimentos	89
 Referências bibliográficas	 91

Índice de figuras

Figura 2.1 -	Direção de Rede e Clientes Tejo e Áreas Operacionais	6
Figura 2.2 -	Investimento realizado na Direção de Rede e Clientes Tejo	7
Figura 2.3 -	Qualidade de serviço na Direção de Rede e Clientes Tejo	8
Figura 2.4 -	Potência instalada PRE na Direção de Rede e Clientes Tejo	8
Figura 2.5 -	Indicadores técnicos da Área Operacional de Leiria	9
Figura 2.6 -	Posto de transformação pré-fabricado, com bloco compacto de isolamento integral de MT	10
Figura 3.1 -	Rede de distribuição em MT de 30kV com representação dos elementos constituintes	13
Figura 3.2 -	Planta de posto de transformação do tipo cabine baixa	15
Figura 3.3 -	Abertura com grelha de ventilação	17
Figura 3.4 -	Distribuição da direção do vento em percentagem na Marinha Grande	19
Figura 3.5 -	Esquema equivalente do transformador real em carga	21
Figura 3.6 -	Variação do rendimento com o índice de carga	26
Figura 3.7 -	Espaçamento entre enrolamentos para circulação de óleo e dissipação do calor	30
Figura 3.8 -	Unidade central de registo de dados	36
Figura 3.9 -	Diagrama de blocos do equipamento de medida	36
Figura 3.10 -	Sensor de leitura digital	37
Figura 3.11 -	Equipamento de medida e sensores interior e exterior da cabina	38
Figura 4.1 -	Linha de pressão neutra devido ao efeito de chaminé ou Buoyancy	43
Figura 4.2 -	Distribuição do coeficiente de pressão em edifício com cobertura plana	47
Figura 4.3 -	Ventilação pelo efeito do vento	50
Figura 4.4 -	Combinação dos efeitos do vento e Buoyancy	51
Figura 4.5 -	Variação da humidade relativa com concentração de vapor de água	55
Figura 4.6 -	Variação da humidade relativa com variação da temperatura	55
Figura 4.7 -	Variação da humidade relativa durante um dia	56
Figura 4.8 -	Descargas parciais em equipamento de MT	59
Figura 4.9 -	Efeitos das descargas parciais num isolador e num transformador de intensidade	61
Figura 4.10 -	Bloco compacto com isolamento parcial	62

Figura 4.11 -	Pormenor da ligação em T dos cabos de MT aos terminais do bloco	63
Figura 5.1 -	Dados obtidos do CB1 com regulação de aberturas em 80%, no inverno	66
Figura 5.2 -	Dados obtidos do CB2 com aberturas no valor nominal, no inverno	66
Figura 5.3 -	Simulação da ação do vento no CB1 e CB2	68
Figura 5.4 -	Simulação da ação do vento e Buoyancy no CB1 e CB2	69
Figura 5.5 -	Carga real de 20 % e simulação para carga de 40 %, no inverno	70
Figura 5.6 -	Simulação para carga de 60 % e simulação para carga 80 %, no inverno ...	72
Figura 5.7 -	Simulação para transformador de 630 kVA, no inverno	73
Figura 5.8 -	Dados obtidos do CB1 com regulação de aberturas em 80%, no verão	75
Figura 5.9 -	Dados obtidos do CB2 com aberturas no valor nominal, no período verão ...	76
Figura 5.10 -	Carga real de 20 % e simulação para carga de 40 %, no verão	77
Figura 5.11 -	Simulação para carga de 60 % e simulação para carga 80 %, no verão	79
Figura 5.12 -	Simulação para transformador de 630 kVA, no verão	80

Índice de tabelas

Tabela 2.1 -	Distribuição das instalações por intervalos de carga	12
Tabela 3.1 -	Características técnicas de transformadores de distribuição herméticos de 30 000/420 V	26
Tabela 3.2 -	Características técnicas dos postos de transformação CB1 e CB2	33
Tabela 4.1 -	Valores médios do coeficiente de pressão em zona urbana	48
Tabela 4.2 -	Coeficiente de transferência térmica em função da espessura	53
Tabela 5.1 -	Comparação das condições de funcionamento do CB1 e CB2	67
Tabela 5.2 -	Simulação da ventilação devido apenas a ação do vento	68
Tabela 5.3 -	Simulação devido ao efeito do vento e Buoyancy	69
Tabela 5.4 -	Dados da carga real a 20 % e simulação para carga de 40 %, no inverno ...	70
Tabela 5.5 -	Simulação para carga de 60 % e 80 %, no inverno	71
Tabela 5.6 -	Simulação com transformador de potência de 630 kVA, no inverno	73
Tabela 5.7 -	Obstrução das aberturas em função da carga do transformador de potência, para o inverno	74
Tabela 5.8 -	Dados da carga real a 20 % e simulação para carga de 40 %, no verão	77
Tabela 5.9 -	Simulação para carga de 60 % e 80 %, no verão	78
Tabela 5.10 -	Simulação com transformador de potência de 630 kVA, no verão	80
Tabela 5.11 -	Obstrução das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência	81
Tabela 5.12 -	Valor máximo da área livre das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência	82
Tabela 5.13 -	Valor de fecho das aberturas e valor máximo da área livre das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência	84

Lista de abreviaturas

AT	Alta Tensão
AO	Área Operacional
BT	Baixa Tensão
CA	Cabina Alta
CB	Cabina Baixa
CB1	Cabina Baixa selecionada 1
CB2	Cabina Baixa selecionada 2
DRCT	Direção de Rede e Clientes Tejo
EDP	Energias de Portugal
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
IP	Iluminação Pública
MT	Média Tensão
PRE	Produtores em Regime Especial
PT	Posto de Transformação
PTAI	Posto de Transformação Aéreo com Interruptor
PTAS	Posto de Transformação Aéreo com Seccionador
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
REN	Redes Energéticas Nacionais
TIEPIMT	Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada em Média Tensão
TP	Transformador de potência
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UTP	Cabo de Par Trançado

Lista de símbolos

A	Área das aberturas de entrada e saída, que são consideradas iguais [m ²]
A_c	Área da superfície de cobertura [m ²]
A_p	Área da superfície de parede [m ²]
C	Índice de carga do transformador
C_d	Coeficiente de descarga
C_p	Coeficiente de pressão estática
C_{p1}	Coeficiente de pressão na fachada com a abertura de entrada
C_{p2}	Coeficiente de pressão na fachada com a abertura de saída
$\cos\varphi_2$	Fator de potência do secundário
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H	Distância entre a altura referência e considerada [m]
HR	Humidade relativa [%]
I_1	Intensidade de corrente no primário [A]
I_2	Intensidade de corrente no secundário [A]
I_{2n}	Intensidade de corrente nominal no secundário [A]
I_{10}	Intensidade de corrente em vazio no primário [A]
K_C	Coeficiente de transmissão térmica da cobertura [W/m ² °C]
K_P	Coeficiente de transmissão térmica da parede [W/m ² °C]
P_0	Perdas em vazio [W]
P_{10}	Perdas no primário em vazio [W]
P_{Joule}	Perdas por efeito de Joule no primário [W]
P_{TP}	Perdas totais do transformador [W]
P_{cc}	Perdas de curto-circuito [W]
P_{cu}	Perdas por efeito de Joule no cobre [W]
P_{fe}	Perdas no ferro [W]
P_1	Potência do primário [W]
P_2	Potência do secundário [W]
P	Pressão [Pa]
p	Pressão do ar na abertura [Pa]
p_0	Pressão estática a uma altura referência [Pa]

p_p	Pressão estática num ponto da cabina [Pa]
P_V	Pressão devido ao vento na fachada [Pa]
$P_{e,0}$	Pressão exterior à altura de referência [Pa]
$P_{e,H}$	Pressão exterior à altura H [Pa]
$P_{i,0}$	Pressão interior à altura de referência [Pa]
$P_{i,H}$	Pressão interior à altura H [Pa]
Q	Caudal de ar [m^3/s]
Q_{Diss}	Caudal necessário dissipação de calor do transformador [m^3/s]
Q_B	Caudal resultante do efeito de Buoyancy [m^3/s]
Q_T	Caudal total devido ao efeito do vento e Buoyancy [m^3/s]
Q_V	Caudal resultante do efeito do vento [m^3/s]
Q_{PC}	Perdas pela parede e cobertura [W]
Q_d	Perdas por dispersão magnética [W]
R_1	Resistência do enrolamento primário [Ω]
R_2	Resistência do enrolamento secundário [Ω]
R_s	Resistência equivalente reduzida ao secundário [Ω]
R	Constante dos gases perfeitos [J/kg K]
S_n	Potência aparente do transformador [VA]
T	Temperatura [$^{\circ}\text{C}$]
T_{PO}	Temperatura de ponto de orvalho [$^{\circ}\text{C}$]
T_e	Temperatura exterior [$^{\circ}\text{C}$]
T_i	Temperatura interior [$^{\circ}\text{C}$]
U_{20}	Tensão do secundário em vazio [V]
V	Velocidade do vento [km/h]
V_0	Velocidade do vento a uma altura de referência [m/s]
v_0	Velocidade do ar pela abertura [m/s]
W	Quantidade de vapor de água [g/kg]
W_s	Quantidade total de vapor de água de saturação [g/kg]
X_s	Reatância equivalente reduzida ao secundário [Ω]
z_0	Nível de altura referenciada [m]
z_H	Nível de altura considerada [m]
ΔC_p	Variação do coeficiente de pressão
ΔP_B	Diferença de pressão devido ao efeito de Bouyancy [Pa]

ΔP_T	Diferença de pressão total [Pa]
ΔP_V	Diferença de pressão devido ao efeito do vento [Pa]
ΔP_e	Diferença de pressão aplicada ao exterior [Pa]
ΔP_i	Diferença de pressão aplicada ao interior [Pa]
ΔP	Diferença de pressão através da abertura [Pa]
ΔT	Diferença de temperatura entre o interior e exterior [°C]
η	Rendimento do transformador
ρ_e	Densidade do ar referenciado ao exterior [kg/m ³]
ρ_i	Densidade do ar referenciado ao interior [kg/m ³]
ρ	Massa específica do ar [kg/m ³]

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Este trabalho foi realizado com base numa investigação e pretende-se analisar o comportamento do equipamento de MT em postos de transformação de 30 kV e a forma como a ventilação influencia a variação da temperatura e humidade que originam efeitos secundários sobre os equipamentos no interior das cabinas.

Os postos de transformação são elementos importantes no funcionamento do sistema de distribuição de energia e este estudo incide sobre os postos de transformação de construção em alvenaria que representam 31% do total de postos de transformação existentes na área onde este estudo foi realizado [1].

A cabina dos postos de transformação é dotada de aberturas de ventilação a níveis de altura diferentes de modo a proporcionar circulação de ar entre o interior e o exterior. A orientação e características da envolvente da cabina contribuem para o nível de capacidade térmica e performance da ventilação, que quando combinado com o efeito do vento podem proporcionar um aumento ou diminuição da ventilação.

No interior da cabina existe o equipamento elétrico de Média Tensão - MT e de Baixa Tensão - BT constituído pelo transformador de potência, equipamento de MT de corte com abertura no ar e quadro geral de baixa tensão.

O transformador de potência é o elemento que mais calor produz no interior da cabina, este é transferido pela sua superfície de refrigeração para o meio ambiente circundante e transferido para o exterior pela ventilação natural gerada pelas aberturas. Esta ventilação é traduzida num caudal de ar cuja variação está dependente da variação da carga do transformador, da diferença de temperatura entre interior e exterior e do tamanho, tipo e posição das aberturas.

Para analisar a ventilação no interior da cabina e o modo como influência a relação entre temperatura e humidade é importante obter medições destas grandezas. Para o efeito foi projetado e instalado um equipamento eletrónico de aquisição e armazenamento de medições para registar essas variáveis de uma forma continua.

Este equipamento foi montado em dois postos de transformação selecionados da rede de distribuição de energia elétrica. O primeiro com obstrução das aberturas em 80 % do valor nominal, através da aplicação de placas de acrílico, ajustada para o regime de carga médio no período de Inverno. Esta instalação apresenta o equipamento de MT em bom estado de conservação. O segundo com as aberturas no valor nominal apresenta o equipamento em mau estado de conservação que implica a sua substituição imediata.

A análise de dados recolhidos permite verificar que, com a capacidade de se proceder ao ajuste das aberturas de ventilação é possível atingir um valor de temperatura mais estável no interior da cabina e independente das condições registadas no exterior. O calor produzido pelo transformador de potência ao ser aproveitado para elevar e manter a estabilidade da temperatura no interior da cabina contribui para a redução dos valores de humidade relativa.

Condições prolongadas e desfavoráveis com níveis de humidade elevados contribuem para acelerar o envelhecimento e degradação do equipamento de MT, que em conjunto com descargas parciais e ionização resultam em reações químicas corrosivas para o equipamento e consequente redução do seu tempo de vida útil. As falhas de funcionamento inerentes a estas situações causam interrupções indesejáveis no fornecimento de energia elétrica que no final culminam com a necessidade de substituição do equipamento.

A regulação da ventilação da cabina deve ser dimensionada para o regime de carga médio do transformador e calculada para o período do inverno. O cálculo teórico permite determinar qual o valor da regulação das aberturas adequado a aplicar no posto de transformação, através de uma implementação prática de baixo custo.

Foram considerados dois períodos de análise, o período de inverno e de verão. No período de inverno o posto de transformação com ajuste nas aberturas de ventilação tem melhor comportamento do ponto de vista da estabilidade térmica, em comparação com o posto de transformação com as aberturas no valor nominal. No período de verão o posto de transformação com ajuste nas aberturas de ventilação tem capacidade para a refrigeração do transformador e apresenta uma boa estabilidade térmica.

Com base na análise do comportamento da ventilação dos dois postos de transformação, obtiveram-se conclusões que permitem implementar melhorias no funcionamento dos postos de transformação, através de ações práticas integradas nas ações de manutenção preventiva.

1.2 Objetivos do trabalho

Para analisar o comportamento dos equipamentos de média tensão sob efeito da temperatura e humidade é necessário identificar qual a influência da ventilação na variação destas grandezas no interior dos postos de transformação e os efeitos secundários originados sobre o equipamento de MT.

Em síntese, os objetivos deste trabalho foram os seguintes:

- Avaliação da ventilação nos postos de transformação.
- Determinação do efeito da humidade no equipamento de MT.
- Reações decorrentes da existência de humidade.
- Conclusões e melhorias passíveis de implementação.

1.3 Organização e estruturação do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos que incorporam os temas considerados na sua análise.

No capítulo um, pretende-se de uma forma geral, fazer uma introdução ao contexto deste trabalho e descreve-se de forma sucinta qual o problema e onde este se insere no sistema de distribuição de energia elétrica.

No capítulo dois, descreve-se de uma forma sucinta a EDP Distribuição dando-se principal realce à Direção de Rede e Clientes Tejo e à Área Operacional de Leiria, local onde este trabalho foi realizado. A informação prestada tem um carácter informativo que permite realçar a importância do tema nos indicadores da EDP Distribuição.

No capítulo três, aborda-se as características dos postos de transformação em estudo e as influências climáticas mediante a sua implementação geográfica. Outro ponto importante está relacionado com o tipo de transformadores de potência normalmente utilizados nos postos de transformação, tendo sido aprofundada a análise do tipo de perdas nestes transformadores e as considerações normativas para a sua utilização. Descreve-se os mecanismos de transferência de calor e as características do equipamento de monitorização que foi utilizado neste trabalho.

No capítulo quatro, descreve-se com alguma profundidade o tema da ventilação natural, os conceitos envolvidos no seu processo, a forma como se desenvolve e como se pode traduzir em expressões matemáticas. Aborda-se a influência da ação do vento sobre a ventilação natural. Aprofunda-se a relação existente entre temperatura e humidade relativa, a influência destas grandezas sobre os equipamentos de MT e os efeitos secundários produzidos sobre estes equipamentos.

No capítulo cinco, analisa-se o comportamento da ventilação nos postos de transformação selecionados, através dos dados obtidos pela monitorização realizada. Este estudo divide-se em dois períodos, o de inverno e de verão. Os temas desenvolvidos nos capítulos anteriores foram aqui aplicados, permitindo a realização de cálculos e simulações que culminam na elaboração de uma tabela. Esta tabela tem como base, diferentes valores de potência nominal nos transformadores e diferentes níveis de carga, onde se apresenta os valores apropriados para a regulação das aberturas de ventilação dos postos de transformação.

Finalmente, no capítulo seis, são apresentadas as principais conclusões do trabalho realizado e sugeridas propostas para trabalhos futuros de continuidade desta investigação.

CAPÍTULO 2

EDP DISTRIBUIÇÃO

2.1 Considerações gerais

A reestruturação do setor elétrico levou ao conhecido processo de segmentação do sistema elétrico em quatro áreas bem definidas: produção, transporte, distribuição e comercialização de energia elétrica. A função principal dos sistemas elétricos é o fornecimento de energia elétrica aos consumidores de uma forma segura, com qualidade e disponibilidade.

Em Portugal a principal operadora na distribuição da energia elétrica é a EDP Distribuição, que se encontra dividida em seis Direções de Rede e Clientes e cada uma delas dividida em Áreas Operacionais. Estas Direções asseguram a cobertura do território nacional continental no exercício da atividade regulada pela Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos - ERSE como Operador da Rede de Distribuição.

A EDP Distribuição rege-se por dois tipos de contratos de concessão, o primeiro em alta tensão e média tensão com o Estado e o segundo em baixa tensão com todos os Municípios existentes no país.

É da responsabilidade da EDP Distribuição manter o bom funcionamento da rede de distribuição, das instalações que dela fazem parte, da manutenção, conservação, segurança e implementação de melhorias de funcionamento ao nível da distribuição de energia.

2.2 Caracterização da Direção de Rede e Clientes Tejo

A Direção de Rede e Clientes Tejo - DRCT com 311 colaboradores abrange 57 concelhos com uma área de 17 558 km² com cerca de 1 235 074 habitantes e tem 785 223 consumidores a que corresponde um consumo de energia anual de 5 627 GWh, (figura 2.1) [2]. Os dados aqui mencionados referem-se ao ano de 2013.



Figura 2.1 Direção de Rede e Clientes Tejo e Áreas Operacionais [2].

Cada uma destas Direções é constituída por vários departamentos para além das Áreas Operacionais, como sendo:

- Estudos de redes de MT/BT.
- Assistência comercial.
- Relações com o exterior.
- Prevenção e segurança.
- Apoio à gestão.

O crescimento e manutenção da rede de distribuição tem custos bastante elevados e a EDP Distribuição tem realizado avultados investimentos em linhas aéreas, subterrâneas, subestações, postos de transformação e contadores. Na DRCT estes custos estão traduzidos no gráfico da figura 2.2.

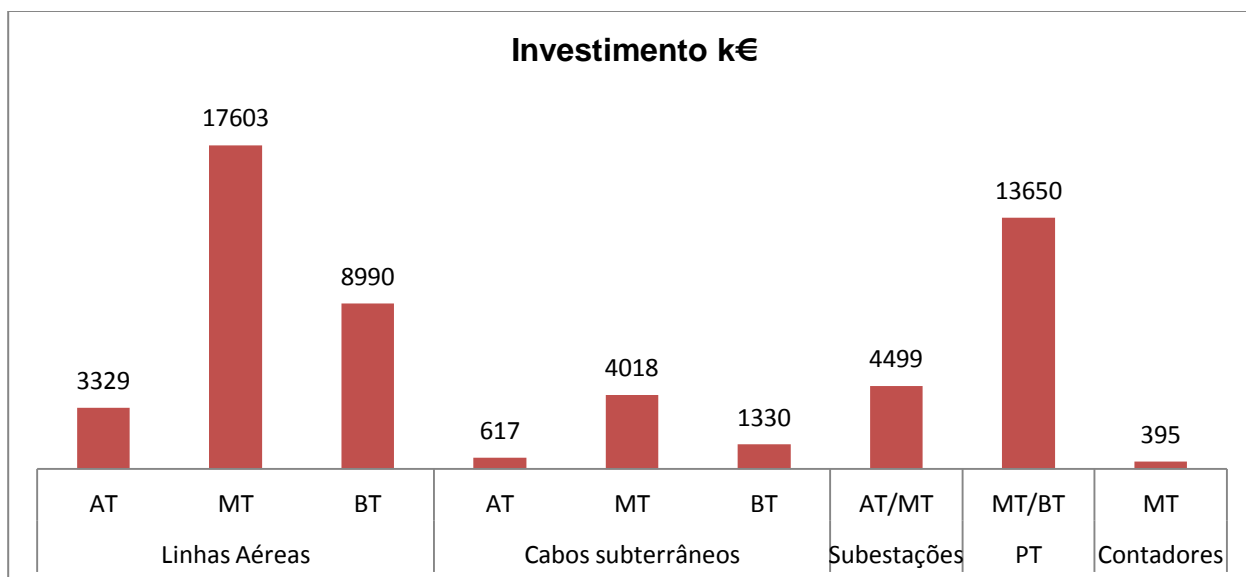


Figura 2.2 Investimento realizado na Direção de Rede e Clientes Tejo [2].

Um ponto importante para a EDP Distribuição é o nível de qualidade do serviço prestado aos seus clientes, que é medido pelo Tempo de Interrupção Equivalente da Potência Instalada em Média Tensão – TIEPIMT em cada zona ao longo de um ano.

Os clientes encontram-se em zonas classificadas da seguinte forma pelo regime de qualidade de serviço:

- Zona A, capitais de distrito e localidades com mais de 25 000 clientes.
- Zona B, localidades com um número de clientes entre 5 000 e 25 000 clientes.
- Zona C, os restantes locais.

A EDP Distribuição fruto dos investimentos que tem vindo a fazer na atualização tecnológica dos equipamentos nos últimos anos tem conseguido prestar um serviço de melhor qualidade.

Na Direção de Rede e Clientes Tejo a qualidade de serviço encontra-se traduzida no gráfico da figura 2.3.

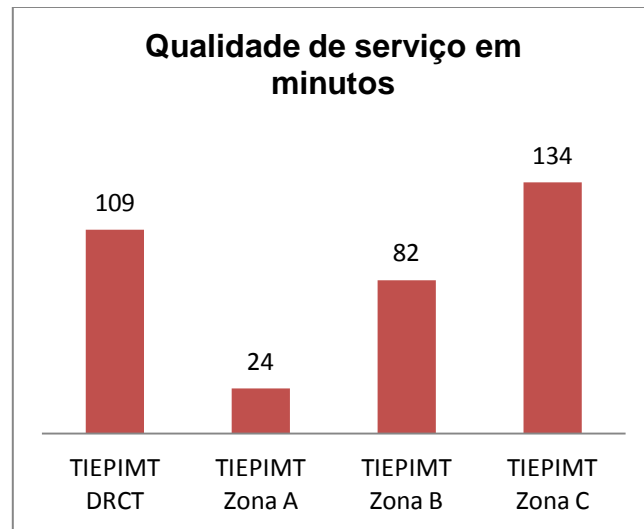


Figura 2.3 Qualidade de serviço na Direção de Rede e Clientes Tejo [2].

Uma das competências da EDP Distribuição abrange a ligação à rede de MT ou BT de Produtores em Regime Especial - PRE. Este ponto obriga a que a tecnologia do equipamento utilizado esteja preparada para receber energia em qualquer ponto da rede, quando num passado próximo a energia era transportada e distribuída dos pontos de produção para pontos de consumo.

Os valores da potência instalada na DRCT estão caracterizados na figura 2.4.

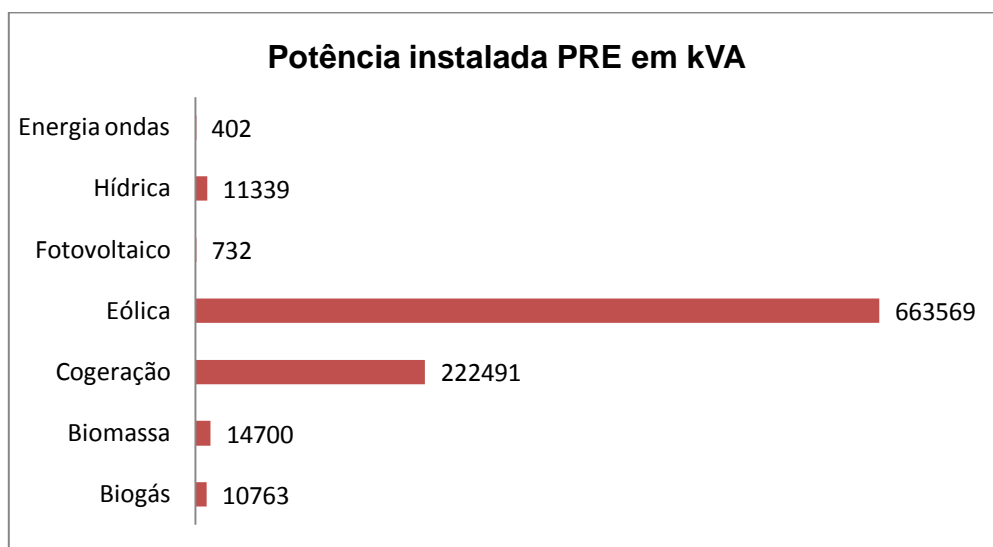


Figura 2.4 Potência instalada PRE na Direção de Rede e Clientes Tejo [2].

2.3 Área Operacional de Leiria

A Área Operacional de Leiria conta com 50 colaboradores abrange oito concelhos com uma área de 2 491 km², com 204 046 consumidores a que corresponde um consumo de energia anual de 1 691 GWh. Nesta Área Operacional existem dois pontos injetores das Redes Energéticas Nacionais – REN nas subestações AT/MT de Pombal e Batalha.

A distribuição da energia em alta, média e baixa tensão é realizada através de rede aérea ou através de rede subterrânea. Na alta tensão, a distribuição é realizada com um valor de tensão nominal igual ou superior a 60 kV. Na média tensão, as tensões mais comuns são de 10, 15 e 30 kV, sendo a última a que tendencialmente é mais utilizada. A distribuição de energia em baixa tensão é efetuada através de uma rede com 5 627 Km de extensão e é realizada a partir dos Postos de Transformação - PT em sistema trifásico com condutor Iluminação Pública – IP, (figura 2.5) [3].

Deve-se ter em consideração duas exceções para as categorias de tensão mencionadas. A primeira para a linha Linhoso-Pedralva-Braga com 50 km a segunda Braga-Ruivães com 18 km de extensão, que está integrada na rede de distribuição com uma tensão nominal de 130 kV. A segunda está relacionada com a distribuição de energia na cidade de Elvas, local onde a distribuição é efetuada a 6 kV.

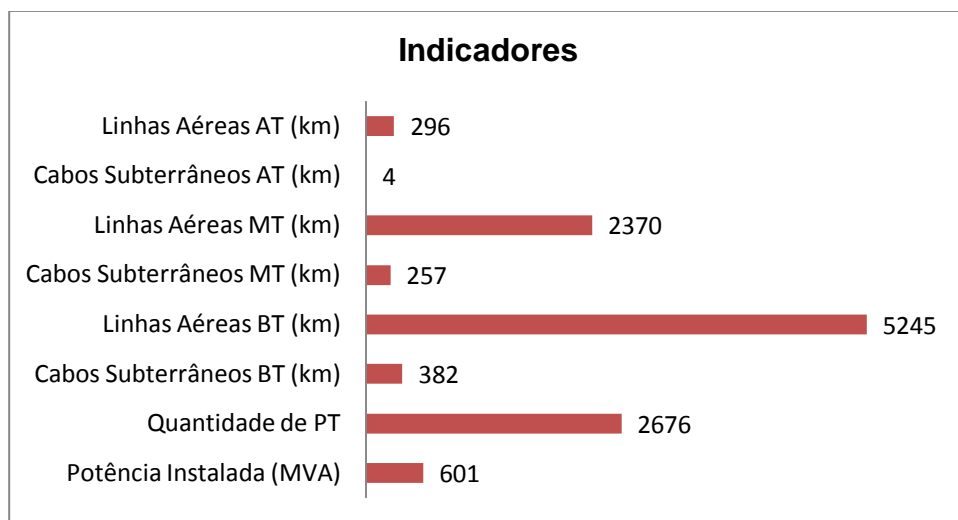


Figura 2.5 Indicadores técnicos da Área Operacional de Leiria [2].

Os postos de transformação são instalações que fazem parte da rede elétrica de distribuição e que podem ser de vários tipos do ponto de vista construtivo, tais como, cabinas de construção em alvenaria, monobloco metálicos, betão pré-fabricado e PT aéreos, correspondendo a um total de 2 676 instalações com uma potência total instalada de 601 MVA.

As cabinas de construção em alvenaria do tipo Cabine Baixa - CB e Cabine Alta - CA são a base dos postos de transformação da rede de distribuição e contém normalmente no seu interior o transformador de potência, equipamento de corte com abertura no ar e quadro geral de baixa tensão.

As cabinas de monobloco metálico foram pouco utilizadas provavelmente por questões térmicas, de segurança e garantia de qualidade de serviço.

As cabinas pré-fabricadas são atualmente as mais utilizadas quando se pretende potências nesses pontos de distribuição até 630 kVA e são equipadas normalmente com o transformador de potência, bloco compacto de média tensão com isolamento integral com fecho e abertura em Hexafluoreto de Enxofre - SF_6 e quadro geral de baixa tensão, (figura 2.6).



Figura 2.6 Posto de transformação pré-fabricado, com bloco compacto de isolamento integral de MT.

Os postos de transformação aéreos são cada vez mais utilizados especialmente em zonas de distribuição através de rede aérea. Inicialmente eram utilizados dois tipos de postos de transformação, a saber:

- Postos de Transformação Aéreos com Seccionador - PTAS, que utilizam transformador de potência até 100 kVA.
- Postos de Transformação Aéreos com Interruptor - PTAI, que utilizam transformador de potência de 160 até 250 kVA.

Atualmente são utilizados os postos de transformação aéreos do tipo R100 e R250, onde a alteração mais significativa está relacionada com o Quadro Geral de Baixa Tensão – QGBT.

Os postos de transformação aéreos do tipo R100 utilizam transformador de potência até 100 kVA, com uma saída para iluminação pública e uma saída em baixa tensão.

Os postos de transformação aéreos do tipo R250 são equipados com transformador de potência até 250 kVA, uma saída para iluminação pública e três saídas em baixa tensão.

2.4 Aspetos técnicos

Nos postos de transformação com cabina em alvenaria, as aberturas são tipicamente dimensionadas para a dissipação de calor produzido pelo transformador de potência considerando uma potência máxima de 630 kVA e um regime de carga nominal durante o período de verão [4].

A análise de dados sobre este tipo de instalações na Área Operacional em estudo mostra que, a quantidade de instalações que funcionam com um regime de carga médio inferior ou igual a 50 % corresponde a 18 % do total das instalações naquela zona, (tabela 2.1) [1].

Tabela 2.1 Distribuição das instalações por intervalos de carga.

Valor da carga média do TP	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Quantidade de instalações	98	83	66	101	119
Total de 18 % de instalações	467				

Os postos de transformação em funcionamento nestas condições com regime de carga baixo e com aberturas de ventilação no seu valor nominal, permite deduzir que a temperatura no interior da cabina seja inferior ao previsto pelo projeto inicial e que a humidade relativa é influenciada atingindo valores mais elevados.

Esta situação continuada conduz a efeitos secundários indesejados nos equipamentos de MT, verificando-se que a quantidade de instalações a funcionar nestas condições apresenta um valor significativo.

CAPÍTULO 3

POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO

3.1 Considerações gerais

Os postos de transformação são instalações constituintes da rede de distribuição de energia elétrica onde se procede à transformação da energia de MT para BT, com a finalidade de alimentar a rede de distribuição de BT, (figura 3.1).

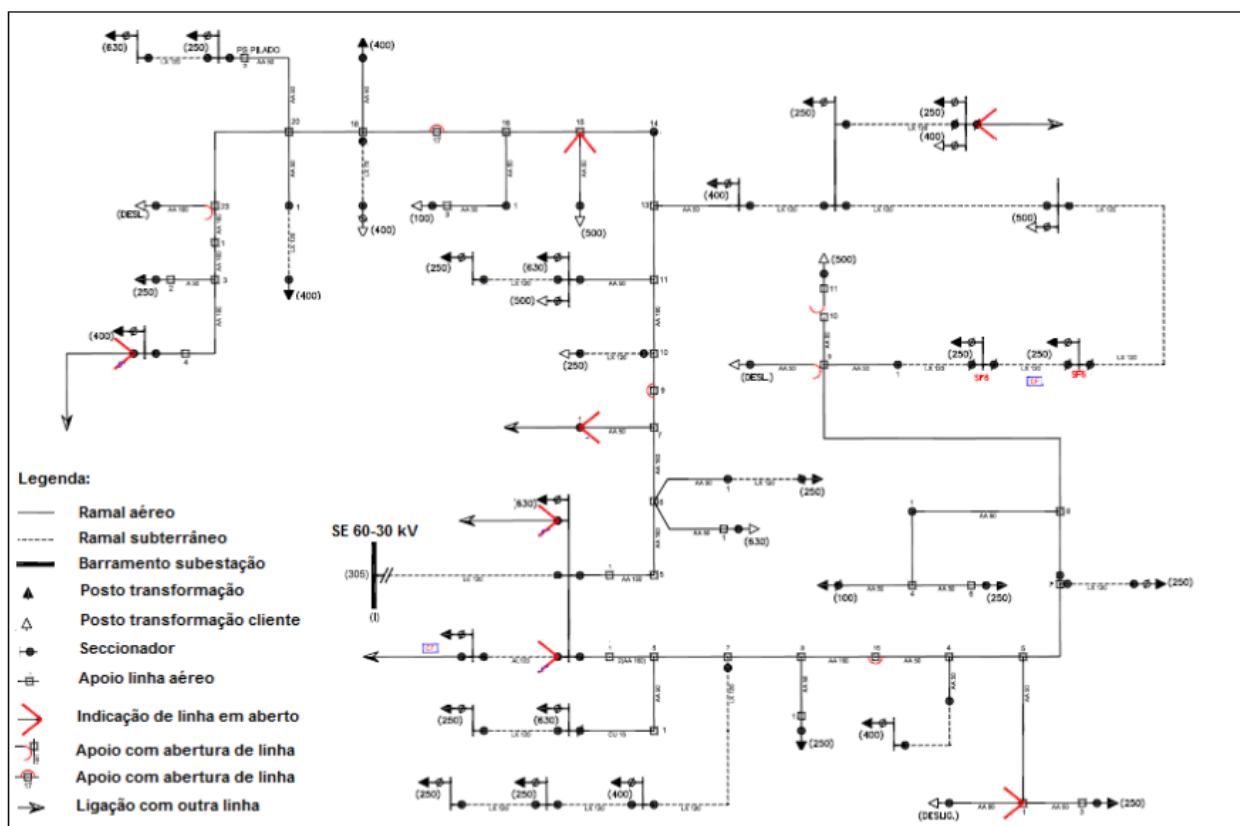


Figura 3.1 Rede de distribuição em MT de 30 kV com representação dos elementos constituintes [1].

Os postos de transformação com cabina de construção em alvenaria são dotados de alguns detalhes construtivos e utilizam materiais que lhes conferem características próprias.

A sua localização e meio envolvente conjugados com detalhes das aberturas de ventilação têm impacto na eficiência da ventilação natural gerada no seu interior.

Os detalhes descritos nos pontos seguintes são importantes para a melhoria da ventilação natural das cabinas dos postos de transformação, podendo contribuir para aumentar ou diminuir a performance da ventilação e das condições de temperatura e humidade relativa no interior. A integração cuidada destes detalhes permite melhorar as características da cabina que assegura uma ventilação apropriada.

Na realidade, a possibilidade de influenciar o modo da ventilação natural numa cabina reflete-se na regulação das aberturas de ventilação, outros itens mencionados neste capítulo estão da melhor ou pior forma implementados, ficando limitada ações de atuação sobre eles, isto é, a sua orientação geográfica e massa térmica.

Os postos de transformação podem integrar no interior um ou mais transformadores de potência que transformam o valor da tensão utilizado na distribuição em média tensão para baixa tensão.

Neste processo, o transformador de potência gera calor com origem nas perdas de transformação, sendo o elemento que mais calor gera dentro da cabina o qual é removido para o exterior através da ventilação natural.

Neste capítulo são avaliadas as características específicas de projeto para os postos de transformação, as aberturas de ventilação, a massa térmica da cabina e a sua orientação no terreno. Será realizada a análise do tipo de transformador mais comum e alguns aspetos técnicos dos transformadores utilizados nos postos de transformação, aprofundando as perdas traduzidas em calor e o caudal de ventilação necessário para a refrigeração do transformador. No final deste capítulo apresentam-se as características dos dois postos de transformação do tipo cabina baixa selecionados para realizar medições, onde foram montados os equipamentos de medida e registo dos valores de temperatura e humidade relativa.

3.2 Características dos postos transformação

3.2.1 Aspetos construtivos

Os postos de transformação do tipo cabina baixa, têm a sua construção baseada em alvenaria e betão. O pavimento da cabina em betão é estabelecido a 0.20 m do solo e nas zonas exteriores às celas existe uma rede de equipotencialidade que juntamente com as ferragens, estrutura metálica das celas, porta de entrada na cabina e estruturas metálicas do lado de baixa tensão se encontra ligada ao circuito da terra de proteção.

As paredes utilizam normalmente tijolo com acabamento em reboco no interior e exterior, apresentando uma espessura mínima de 0.20 m. A cobertura é construída por betão armado com mínimo de 0.1 m que além de ser impermeável deve ser saliente para evitar a penetração de água pelas paredes. A cabina baixa tem normalmente forma paralelepípedica e as dimensões mínimas são 4.0 x 3.2 m com um pé direito mínimo de 2.5 m. O acesso ao interior da cabina é realizado por uma porta de chapa de aço galvanizado ou alumínio com espessura de 2 mm de dimensões 1.30 x 2.20 m. A porta tem a abertura em duas folhas para o exterior da cabina, (figura 3.2) [5].

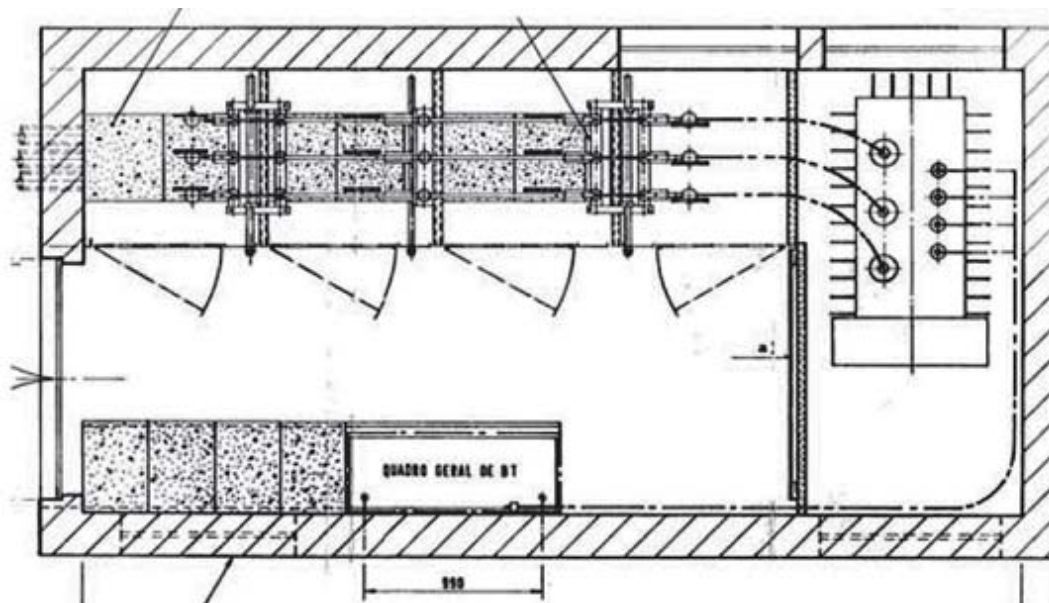


Figura 3.2 Planta de posto de transformação do tipo cabine baixa [5].

3.2.2 Aberturas de ventilação

A ventilação natural é originada pelas aberturas na cabina que providenciam a entrada de ar fresco do exterior e saída do ar quente. A forma como o ar entra e sai da cabina é tão importante como a quantidade de ar movimentada nesse processo, estando esta relacionada com a geometria da abertura, o seu posicionamento e a sua orientação relativamente à direção do vento predominante naquela área geográfica.

O tipo de abertura com uma área efetiva através da qual o ar flui, influencia o modo de entrada ou saída do ar na cabina. O coeficiente de descarga representa o efeito da resistência hidráulica da abertura à passagem do ar. Normalmente é considerado para este coeficiente de descarga o valor de 0.6 atribuído a aberturas retangulares [6].

A possibilidade de efetuar a regulação da área destas aberturas permite alterar as condições de temperatura e humidade no interior da cabina, ou seja, realizar o controlo sobre a ventilação no interior da cabina.

Quando se avalia a ação da ventilação, o caminho percorrido entre o ponto de entrada e de saída deve ser tido em consideração. Na ventilação natural quanto maior for a diferença entre o nível de entrada e de saída do ar mais eficaz é o seu efeito.

A ventilação nos postos de transformação é realizada normalmente através de duas aberturas com dimensão de 1.00 x 0.30 m, estando a abertura de entrada localizada a 0.20 m do solo e de saída a 0.20 m da cobertura. Estas aberturas estão situadas normalmente em paredes opostas.

As aberturas de entrada e saída de ar são protegidas com persianas metálicas do tipo veneziana por forma a impedir o acesso direto ao interior do posto de transformação e possível contato com partes em tensão. Estas poderão ainda ser protegidas interiormente por uma rede metálica plastificada, de modo a evitar a entrada de pequenos animais, (figura 3.3) [5].



Figura 3.3 Abertura com grelha de ventilação [5].

3.2.3 Aspetos térmicos

A massa térmica dos postos de transformação representa a capacidade da cabina em armazenar maior ou menor quantidade de calor ou energia de arrefecimento durante os períodos de inverno e verão e dependem do tipo de material usado na sua construção. Esta capacidade térmica pode implicar a redução ou aumento da quantidade de ventilação necessária de modo a obter uma determinada temperatura no interior da cabina idealmente constante, evitando grandes diferenciais de temperatura que podem originar a condensação da humidade no seu interior [7].

Durante os meses de inverno a massa térmica da cabina pode ser usada para conservar a temperatura, tirando partido das variações de carga do transformador no seu interior. Durante os meses de verão a massa térmica da cabina pode ser usada para manter a temperatura aquando de um rápido arrefecimento noturno.

Os fatores que contribuem para a performance térmica da cabina do posto de transformação são os materiais de construção, as cargas térmicas no interior, a temperatura média interna e o caudal de ar.

Os materiais de construção influenciam a condutividade térmica pelas paredes e cobertura e o aquecimento ou arrefecimento passivo. Quanto maior for a massa térmica da cabina melhor retém a energia de aquecimento ou arrefecimento por maiores períodos.

A carga térmica interna tem impacto nas temperaturas do espaço interior, tendo estas como principal fonte, a quantidade de transformadores de potência dentro da cabina.

A libertação de calor devido as perdas do transformador originam a movimentação do ar no interior da cabina, o calor por eles gerado aumenta a temperatura média interna, o qual é removido para o exterior através do caudal de ar gerado pela ventilação natural.

3.3 Orientação geográfica e influências climáticas

A orientação em conjunto com as características da cabina dos postos de transformação, contribuem para o impacto ao nível térmico e da performance da ventilação natural.

A orientação e geometria da cabina têm influência na contribuição para uma maior ou menor ventilação no seu interior. As características da cabina ou arborização da envolvente tem impacto sobre a movimentação do ar no exterior junto à cabina, podendo contribuir para o aumento ou diminuição da ventilação no seu interior.

A cidade da Marinha Grande que tem influência marítima e grandes áreas industriais exigentes com grandes consumos de energia elétrica é o local onde se situam os dois postos de transformação selecionados para este estudo.

Em Portugal o clima é considerado temperado com inverno suave na classificação de *Köppen Geiger* [8]. A Marinha Grande encontra-se a uma altitude de 90 m em relação ao nível do mar e tem tipicamente uma temperatura média anual de 15.3 °C com uma pluviosidade média de 810 mm.

O mês de agosto é o mês mais quente do ano com uma temperatura média de 20.2 °C, o mês de janeiro é o mês mais frio do ano com uma temperatura média de 10.5 °C [9].

A direção do vento na zona da Marinha Grande tem grande predominância de noroeste, a zona litoral oeste norte é fortemente influenciada pela brisa marítima. Este efeito é maior nos meses quentes com forte predominância durante as tardes e pode estar sujeito a vento com forte componente norte conhecido por nortada, que tem como origem a ação conjunta da brisa marítima com a depressão de origem térmica que se forma no centro da península ibérica durante o verão. A velocidade média do vento registado é de 16,7 Km/h, (figura 3.4) [10].

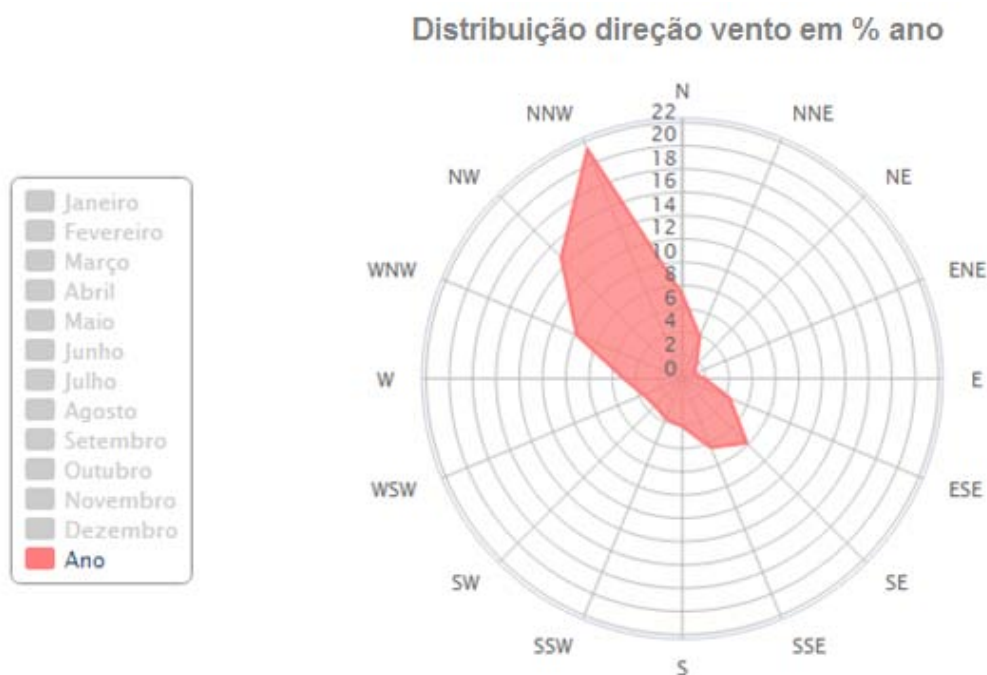


Figura 3.4 Distribuição da direção do vento em percentagem na Marinha Grande [10].

A recomendação da Direção Geral de Energia e Geologia [5] para a orientação dos postos de transformação é que a abertura de entrada deve ficar preferencialmente voltada a norte, a realidade mostra que nem sempre isso se verifica, pelos mais variados motivos que possam ter ocorrido durante a construção dos postos de transformação.

3.4 Transformadores de potência

3.4.1 Tipos de transformadores

São utilizados nos postos de transformação basicamente dois tipos de transformadores, em banho de óleo e secos.

O mais comum é o transformador em óleo, onde o circuito magnético e enrolamento se encontram dentro de uma cuba cheia de óleo devido a apresentar uma grande estabilidade a alta temperatura e elevadas características isolantes. O óleo tem como principal função garantir o isolamento elétrico, extinguir descargas parciais e arcos elétricos e conduzir o calor gerado no enrolamento de cobre para a superfície da cuba do transformador, permitindo assim a utilização de potências e tensões elevadas.

O transformador do tipo seco tem o enrolamento envolvido em resina que lhe confere maior robustez mecânica apresentando um menor nível de descargas parciais internas. É dotado de uma maior segurança e fiabilidade sendo mais utilizados em postos de transformação integrados em edifícios públicos, centros comerciais e outros. São limitados pelo valor de potência e tensão apresentando um custo superior [11].

Os transformadores são máquinas elétricas estáticas com dois ou mais enrolamentos que através de indução eletromagnética, transformam um sistema de tensões e correntes alternadas em um ou vários sistemas de tensões e correntes alternadas geralmente com intensidades e tensões diferentes, mantendo a mesma frequência com o intuito de transmitir a potência elétrica. Este tipo de máquina atinge valores de rendimentos bastante elevados até 99% e podem ser utilizados como elevadores ou redutores de tensões [12].

3.4.2 Perdas e rendimento no transformador

Apesar dos transformadores serem máquinas elétricas com elevado rendimento apresentam perdas de energia que podem atingir alguns kilowatt. Os tipos de perdas nos transformadores são [13]:

- Perdas no cobre, por efeito de Joule, aproximadamente iguais às perdas do ensaio em curto-circuito.
- Perdas no ferro, por efeito de histerese e correntes de Foucault, aproximadamente iguais às perdas do ensaio em vazio.
- Perdas por dispersão magnética.

A seguinte explicação teórica tem como base o esquema equivalente do transformador real em carga ou esquema de *Steinmetz*, representado na figura 3.5.

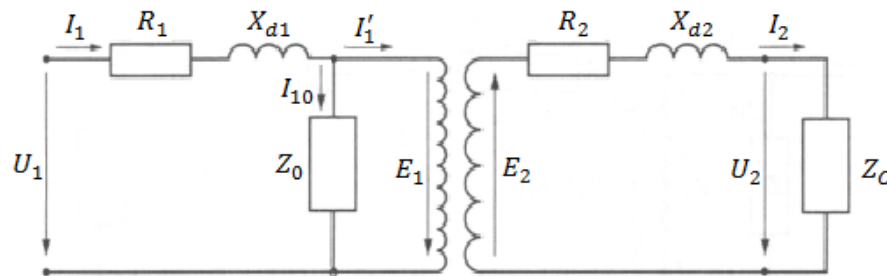


Figura 3.5 Esquema equivalente do transformador real em carga [12].

3.4.2.1 Perdas por efeito de Joule

As perdas nos enrolamentos pelo efeito de Joule são perdas de dissipação de calor devido à passagem de corrente nos enrolamentos e normalmente designadas por perdas no cobre. Estas perdas são variáveis e dependem do regime de carga do transformador, sendo analiticamente traduzidas pela expressão (3.1):

$$P_{cu} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (3.1)$$

Onde:

P_{cu} - perdas por efeito de Joule no cobre [W];

R_1 - resistência do enrolamento primário [Ω];

R_2 - resistência do enrolamento secundário [Ω];

I_1 - intensidade de corrente no primário [A];

I_2 - intensidade de corrente no secundário [A].

Considerando o esquema equivalente do transformador com o primário reduzido ao secundário e desprezando a corrente em vazio no primário obtém-se a expressão (3.2):

$$P_{cu} = R_s I_2^2 \quad (3.2)$$

As perdas no cobre são obtidas a partir do ensaio em curto-circuito, expressão (3.3):

$$P_{cunominal} = P_{cc} = R_s I_{2n}^2 \quad (3.3)$$

Sendo:

P_{cc} – perdas de curto-circuito [W];

R_s - resistência equivalente reduzida ao secundário [Ω];

I_{2n} – intensidade de corrente nominal no secundário [A].

No ensaio do transformador em curto-circuito, as perdas no ferro são desprezáveis, devido à tensão de curto-circuito ter valores cerca de 5 % do valor da tensão nominal aplicada ao primário, pelo que o fluxo e a indução magnética também são 5 % do seu valor nominal, o que implica que as perdas no ferro neste ensaio sejam desprezáveis.

3.4.2.2 Perdas no ferro

As perdas no ferro são devidas aos efeitos de histerese e correntes de Foucault existentes no ferro do núcleo do transformador, o seu valor só varia com a variação da tensão aplicada ao primário. Como esta tensão é constante e igual à tensão nominal de alimentação, as perdas no ferro são constantes em cada regime de carga. Estas perdas são determinadas pelo ensaio do transformador em vazio, pela expressão (3.4):

$$P_{10} = P_{Joule} + P_{fe} \quad (3.4)$$

As perdas por efeito de Joule no primário podem determinar-se pela expressão (3.5):

$$P_{Joule} = R_1 I_{10}^2 \quad (3.5)$$

Onde:

P_{10} - perdas no primário em vazio [W];

P_{Joule} - perdas por efeito de Joule no primário [W];

P_{fe} - perdas no ferro [W];

I_{10} - intensidade de corrente em vazio no primário [A].

No ensaio do transformador em vazio, as perdas devidas ao efeito de Joule no primário são muito reduzidas, cerca de 2 % do total, face ao fato da corrente e resistência do enrolamento primário em vazio serem reduzidas, então as perdas por efeito de Joule no primário podem ser desprezadas e as perdas em vazio são determinadas por (3.6):

$$P_0 = P_{10} \cong P_{fe} \quad (3.6)$$

Em que:

P_0 - perdas em vazio [W].

A existência das perdas no ferro provoca uma alteração no desfasamento entre a corrente I_{10} e a tensão no primário do transformador U_1 . Este facto tem influência na potência ativa e reativa em jogo no circuito. A corrente em vazio do transformador é constituída por duas componentes, a componente magnetizante do núcleo que está relacionada com a componente reativa e a componente das perdas no ferro por histerese e correntes de Foucault que está relacionada com a componente ativa. O efeito da histerese magnética provoca a deformação na curva sinusoidal da corrente.

3.4.2.3 Perdas por dispersão magnética

As perdas por dispersão magnética são perdas devidas ao fluxo magnético induzido no núcleo e são constituídas pelas linhas de força que se perdem por saírem fora do núcleo de ferro, determinada pela seguinte expressão analítica (3.7):

$$Q_d = X_s I_2^2 \quad (3.7)$$

Em que:

Q_d - perdas por dispersão magnética [W];

X_s - reatância equivalente reduzida ao secundário [Ω].

Como estas perdas estão associadas à reactância indutiva, elas são perdas reativas e constituem uma parte da potência reativa em jogo no transformador.

3.4.2.4 Rendimento do transformador

O rendimento do transformador tem valores normalmente elevados e pode ser determinado com grande precisão a partir de medições obtidas pelos dois tipos de ensaio anteriormente mencionados.

Sabendo que as perdas em vazio são constantes e independentes do regime de carga, as restantes perdas são resultantes do cobre no primário e no secundário e são variáveis para um determinado regime de carga e um fator de potência, sendo dado pela expressão (3.8):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \text{perdas}} \quad (3.8)$$

O rendimento é por definição, dado pelo quociente entre a potência ativa fornecida pelo secundário à carga e a potência ativa absorvida pelo primário à rede, sendo calculado analiticamente através da expressão (3.9):

$$\eta = \frac{U_{20}I_2 \cos\varphi_2}{U_{20}I_2 \cos\varphi_2 + P_{cu} + P_{fe}} \quad (3.9)$$

Onde:

η - rendimento do transformador;

P_1 - potência do primário [W];

P_2 - potência do secundário [W];

U_{20} - tensão do secundário em vazio [V];

$\cos\varphi_2$ - fator de potência do secundário.

O índice de carga do transformador é por definição, dado pelo quociente entre a intensidade de corrente fornecida pelo secundário à carga e a intensidade de corrente nominal do secundário, dada pela expressão (3.10):

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}} \quad (3.10)$$

Sendo:

C - índice de carga do transformador.

Através da expressão das perdas no cobre (3.3), podemos obter o valor das perdas por efeito de Joule no cobre em função da carga (3.10), dado pela expressão (3.11):

$$P_{cu} = R_s I_2^2 = C^2 (R_s I_{2n}^2) = C^2 P_{cc} \quad (3.11)$$

Ou seja:

$$P_{cu} = C^2 P_{cc} \quad (3.12)$$

O rendimento do transformador sendo variável devido as perdas no cobre atinge o seu valor máximo quando as perdas no cobre igualam as perdas no ferro e pode finalmente

ser dado pela expressão (3.13) por substituição de (3.10) e (3.12) em (3.9), conforme representado na figura 3.6:

$$\eta = \frac{CS_n \cos \varphi_2}{CS_n \cos \varphi_2 + P_{cu} + P_{fe}} \quad (3.13)$$

Em que:

S_n - potência aparente do transformador [VA].

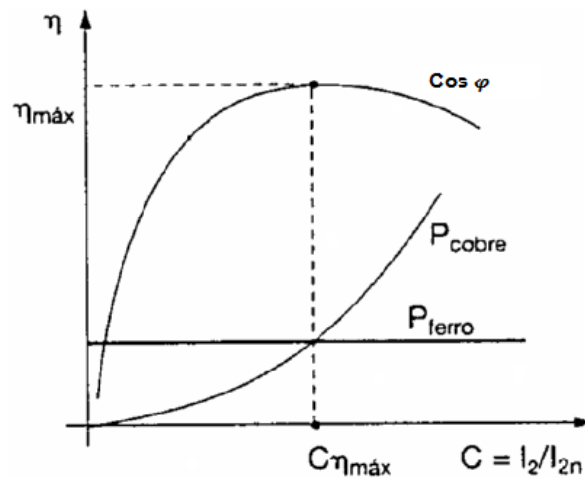


Figura 3.6 Variação do rendimento com o índice de carga [14].

Os fabricantes de transformadores fornecem tabelas com valor das perdas do ferro e cobre que foram considerados para este trabalho, (tabela 3.1).

Tabela 3.1 Características técnicas transformadores de distribuição herméticos de 30 000/420 V [15].

Tensão Nominal 36 kV							
Potência	kVA	160	250	315	400	500	630
Perdas em vazio	W	500	700	820	1000	1170	1400
Perdas em carga (75 °C)	W	2550	3600	4150	5050	5650	6650
Tensão de curto-circuito (75 °C)	%	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Valor de corrente (BT)	A	219.9	343.7	433	549.9	687.3	866
Corrente de curto-circuito (BT)	kA	4.4	6.9	8.7	11	13.7	17.3

3.5 Mecanismo de transferência de calor

O calor é transferido de um corpo para outro desde que exista uma diferença de temperatura entre eles, ou entre dois meios, ou ainda entre duas regiões. Esta transferência é sempre realizada no sentido do corpo com maior temperatura para o corpo com menor temperatura. Todas as substâncias são formadas por átomos que estão agrupados por meio de ligações químicas formando as moléculas. Estas moléculas estão em constante movimento, vibração e deslocam-se a uma determinada velocidade.

O conceito de temperatura está associado a este movimento, definindo-se como uma grandeza física que mede a energia cinética das partículas de um sistema em equilíbrio térmico.

Ao nível molecular, a transferência de calor está fundamentalmente associada ao choque entre as moléculas com diferentes graus de agitação, a cada choque com outra molécula é transferida energia cinética, num processo chamado de difusão de energia térmica [16].

3.5.1 Por condução

A condução de calor é a transferência de calor através do mecanismo de difusão, onde não há transporte de moléculas, sendo o mecanismo de transferência de calor característico dos sólidos.

Nos corpos sólidos as moléculas apresentam uma forte ligação entre si e estão numa estrutura relativamente rígida. Apesar de existir uma transferência de energia cinética entre as moléculas, a sua posição espacial não altera, isto é, as moléculas trocam de energia entre si mas não mudam de lugar no espaço e o calor não é capaz de se propagar instantaneamente. Este processo é designado de mecanismo de difusão.

De uma forma simples este mecanismo ocorre nas partes metálicas do transformador de potência, nos enrolamentos, núcleo e cuba o mesmo sucede nas paredes e cobertura da cabina.

3.5.2 Por convecção

A convecção é a transferência de calor através da matéria em movimento, sendo o mecanismo de transferência de calor característico dos fluidos.

Nos fluidos líquidos e gasosos as moléculas não apresentam uma ligação rígida entre si e podem mudar livremente de lugar no espaço. Apesar de poderem receber energia térmica por difusão quando chocam com uma superfície sólida mais ou menos aquecida, as moléculas do fluido como são livres de se movimentar transportam consigo a energia térmica adquirida.

De forma simples este mecanismo ocorre no óleo de refrigeração do transformador e no caudal de ar gerado pela ventilação natural.

No caso do óleo, quando em contato com as partes mais quentes recebe calor por difusão e aquece, o que provoca a dilatação do óleo, fica menos denso e adquire um movimento ascendente, enquanto o restante óleo mais frio e denso adquire um movimento descendente. Em ambos os movimentos existe transferência de calor.

No caso do ar na cabina, o processo é idêntico ao anterior e adquire o movimento ascendente e descendente, mas como a cabina dispõe de aberturas nas paredes a níveis de altura diferentes, nesses pontos a diferença de densidade do ar entre o lado interior e exterior da abertura é diferente originando a entrada e saída do ar da cabina em conjunto com o efeito anterior.

3.5.3 Por radiação

A radiação é a transferência de calor através das ondas eletromagnéticas, ocorrendo o mecanismo de transferência de calor em qualquer meio, incluindo o vácuo.

As ondas eletromagnéticas são uma manifestação de transmissão de energia e estão relacionadas com o seu comprimento de onda e frequência dando origem ao espectro eletromagnético. A quantidade de energia transportada é proporcional à frequência de

radiação. A radiação com comprimentos de onda pequenos transmite muita energia e comprimentos de onda grandes transmite pouca energia.

A radiação térmica é proveniente da parte intermédia do espectro de luz e contempla uma parte da radiação ultravioleta, todo o espectro de luz visível e radiação infravermelha. O mecanismo responsável pela radiação térmica são as oscilações e transições de alteração de posição dos eletrões dos átomos. Quanto maior for a temperatura maior é o nível de oscilações dos eletrões e maior a energia transmitida por radiação.

Este mecanismo ocorre nas partes quentes do transformador, muito embora o seu efeito seja bastante pequeno e desprezável.

3.6 Transferência de calor no transformador

A energia que se perde no transformador dissipa-se em forma de calor mesmo que esta energia seja apenas uma pequena parte da energia total que entra em jogo e representa uma quantidade considerável nos transformadores de grandes potências. É então necessário transportar o calor dos pontos onde se produz, ou seja, do interior dos enrolamentos e do núcleo magnético para a superfície da cuba e desta para o meio ambiente, sendo este processo realizado por condução e convecção do calor. Nos transformadores em óleo com refrigeração natural este processo é realizado pela circulação natural do óleo através dos enrolamentos e núcleo conduzindo o calor até à sua superfície no interior da cuba. O óleo ao aquecer diminui o seu peso específico e tende a subir obrigando a descer o óleo situado na parte superior circulando em contacto com a superfície da cuba, a uma temperatura inferior, criando assim um efeito de circulação chamado de termossifão, (figura 3.7).

Quanto maior for a potência do transformador, mais difícil se torna dissipar o calor, porque a sua potência aumenta muito mais rapidamente do que a sua superfície de refrigeração, assim, a cuba é dotada de alhetas que contém canais para circulação do óleo ou mesmo tubagem exterior com ventilação forçada. Se por um lado o óleo no

interior segue o efeito antes descrito, por outro através destas técnicas é aumentada a superfície e capacidade de refrigeração [11].

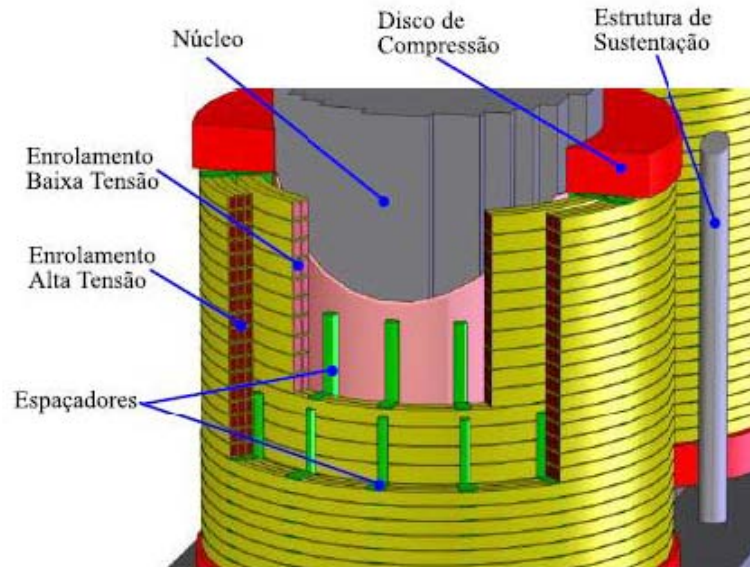


Figura 3.7 Espaçamento entre enrolamentos para circulação de óleo e dissipação do calor [17].

3.7 Dissipação de calor do transformador

A cabina dos postos de transformação é ventilada naturalmente pelas aberturas de entrada e saída para que a renovação de ar seja eficaz na refrigeração do transformador de potência e tenha um correto comportamento do ponto de vista térmico. O calor gerado nos enrolamentos e núcleo é transferido para a superfície de refrigeração e desta para o meio ambiente circundante, sendo transferido para o exterior pela ventilação natural. Esta ventilação é traduzida por um caudal de ar cuja variação está dependente da variação de carga do transformador de potência, da diferença de temperatura entre o interior e o exterior e do tamanho, tipo e posicionamento das aberturas. Em casos excepcionais, como postos de transformação em caves de edifícios, pode haver necessidade de recorrer à utilização de ventilação forçada.

O calor produzido com origem nas perdas do transformador por efeito de Joule, histerese e correntes de Foucault podem ser obtidas pela soma das expressões (3.6) e (3.12), que resultam na expressão (3.14):

$$P_{TP} = P_0 + C^2 P_{CC} \quad (3.14)$$

Sendo:

P_{TP} - perdas totais do transformador [W];

No interior da cabina o total de perdas é obtido pelo somatório de todos os transformadores existentes, ou seja:

$$P_{total} = \Sigma P_{TP} \quad (3.15)$$

A quantidade de calor produzido pelo transformador necessita de um determinado caudal de ar para realizar a sua refrigeração [13], sendo dado pela expressão (3.16):

$$Q_{Diss} = \frac{P_0 + C^2 P_{CC}}{1.16 \Delta T} \quad (3.16)$$

Onde:

Q_{Diss} – caudal necessário dissipação de calor do transformador [m³/s];

ΔT - diferença de temperatura entre o interior e exterior [°C].

3.8 Normas de serviço dos transformadores

Os transformadores de potência seguem condições de serviço e a sua utilização fora dessas condições está condicionada. São consideradas condições normais de serviço quando os transformadores operam dentro das seguintes condições [18]:

- Altitude, utilização até 1000 m acima do nível do mar. Para altitudes superiores o transformador não pode admitir o funcionamento à carga nominal com temperaturas ambientes excessivas.
- Temperatura ambiente e meio de refrigeração, a temperatura do ar ambiente não deve ser inferior a $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e superior a $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$. No caso de transformadores com circuito de arrefecimento a água, a temperatura da água de arrefecimento não deve ser superior a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Meio ambiente das instalações, em meio ambiente muito poluído deve ser tido em atenção as dimensões dos isoladores dos transformadores.

A temperatura ambiente para arrefecimento dos transformadores a óleo com refrigeração natural dentro de cabinas, não devem exceder os seguintes valores [19]:

- $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura média mensal, considerando o mês mais quente, ou
- $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura média anual.

A temperatura média mensal é obtida pela metade da soma das médias diárias máximas com as médias diárias mínimas durante um mês. A temperatura média anual é obtida pela divisão por doze meses, da soma das temperaturas médias mensais.

Em situações normais de funcionamento o transformador deve alcançar o seu tempo de vida útil para o qual foi projetado. Um dos fatores que promove a velocidade de degradação do isolamento está relacionado com a utilização de carga em excesso além da especificada e um ambiente de temperatura mais alto que o projetado. A velocidade de degradação é traduzida por uma função exponencial, tal que, por cada $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ de aumento da temperatura do ponto quente, reduz para metade o tempo de vida do transformador.

O ponto quente do transformador é por definição a temperatura máxima que ocorre em qualquer uma das partes do sistema de isolamento do enrolamento. Este parâmetro representa a limitação térmica do transformador. O ponto quente considera-se na zona superior dos enrolamentos, onde existe maior concentração de calor devido a perdas por correntes de Foucault. Estes enrolamentos podem ser dotados de isolamento elétrico extra que aumenta a sua capacidade térmica [20].

3.9 Seleção dos postos de transformação

Os postos de transformação selecionados estão englobados na rede de distribuição de 30 kV, tem o mesmo tipo de construção, situam-se na mesma zona geográfica a 500 m de distância um do outro mas com diferentes níveis de conservação do equipamento de MT, (tabela 3.2).

O posto de transformação que se designa por CB1, tem equipamento de MT em bom estado de conservação e boas condições de funcionamento e a ventilação encontra-se regulada a 80 % do valor nominal. Apenas 20 % da área das aberturas da cabina permitem a entrada e saída de ar, estando o restante obstruído por placas de acrílico.

O posto de transformação que se designa por CB2, tem o equipamento de MT em mau estado de conservação com elevada frequência de descargas parciais. As aberturas de ventilação encontram-se no seu valor nominal.

Tabela 3.2 Características técnicas dos postos de transformação CB1 e CB2.

	CB1	CB2
Tipo construtivo	Cabina baixa em edifício próprio	Cabina baixa em edifício próprio
Tipo instalação	Posto de transformação com seccionamento	Posto de transformação com seccionamento
Potência [kVA]	250	400
Tensão serviço [kV]	30	30
Índice zona qualidade serviço	B	B
Entrada exploração	18-04-1996	07-07-2000
Tipo equipamento MT	Transformador de 250 kVA. Seccionadores. Interruptor seccionador fusível de corte no ar com Fusíveis. Isoladores suporte barramento resina epoxy.	Transformador de 400 kVA. Seccionadores. Interruptor seccionador fusível de corte no ar com fusíveis. Isoladores suporte barramento resina epoxy.
Intervenções	Inspecções visuais termografia. Medições resistência. Limpeza. Em Junho 2011 a instalação apresentava crepitação e danos em alguns isoladores devido a descargas parciais. Efetuou-se limpeza, aplicação de verniz anti-flash G-142 e regulação da ventilação com obstrução de 80% das aberturas.	Inspecções visuais termografia. Medições resistência. Limpeza. Ventilação com aberturas no valor nominal.
Sintomas atuais	Sem problemas.	Crepitação e danos nos isoladores.
Valor típico utilização potência	20%	16%
Tipo ventilação	Natural por convecção	Natural por convecção
Área ventilação utilizada [m2]	0.20	0.72
Volume interior [m3]	63.4	70.4

3.10 Equipamentos de monitorização

3.10.1 Monitorização de curto e longo prazo

A monitorização de curto prazo é considerada quando se realizam temporariamente medidas sobre determinadas grandezas físicas. Apesar da entrada e saída da quantidade de ar numa cabina de um posto de transformação ser de difícil monitorização a longo prazo, a informação obtida pela monitorização de curto prazo pode ser integrada na monitorização de longo prazo, obtendo-se uma representação ainda mais completa do comportamento das grandezas no interior do posto de transformação. Esta forma de monitorização não foi contemplada neste estudo.

É considerada monitorização de longo prazo, quando conduzida durante um ano de modo a ter uma perceção geral da evolução das condições do interior do posto de transformação. A monitorização deve ser projetada de forma a fornecer suficiente informação e dar uma visão geral do sucedido no interior do posto de transformação. Esta monitorização deve contemplar as cargas térmicas do interior, condições internas de temperatura e humidade e as condições externas que influenciam o comportamento no interior do posto de transformação.

As monitorizações com um intervalo de registo de 15 minutos são usualmente utilizados e fornecem informação suficiente para caracterizar cada hora no interior do posto de transformação, sabendo que, as variações térmicas e a ventilação natural são processos relativamente lentos.

Este sistema de monitorização foi implementado no CB1 e CB2 no final do mês de março depois dos equipamentos de monitorização terem sido projetados, construídos e testados. Semanalmente são recolhidos e analisados os dados registados pelos equipamentos de monitorização instalados nas cabinas.

De preferência, este sistema deve manter-se a funcionar durante um ano de modo a obter dados da evolução das condições no interior da cabina durante esse período.

3.10.2 Características dos equipamentos de medida

Para a análise das condições de temperatura e humidade no interior da cabina é importante obter medições utilizando equipamentos apropriados. Foi necessário desenvolver e construir um equipamento eletrónico para a aquisição e armazenamento de medidas de modo a adquirir dados de uma forma contínua a partir de vários pontos de leituras na cabina do posto de transformação.

O equipamento de aquisição e armazenamento de medições tem como base um relógio eletrónico de tempo real DS1307 e uma unidade central que foi programada para a realização de registos a cada 15 minutos da informação lida por todos os sensores digitais.

Os dados das leituras são armazenados em cartão de memória SD de 2 Gb de modo a facilitar o acesso aos registos.

Foram utilizadas placas eletrónicas Arduino do tipo *UNO R3* que permitem ser programadas e parametrizadas para o registo de informação proveniente da leitura dos sensores e também apresenta uma grande facilidade de comunicação com computador.

A placa Arduino tem como base um microprocessador baseado no *ATmega 328* com 14 entradas de registos digitais, seis entradas analógicas, funcionamento a 16 MHz e ligação USB para computador.

A alimentação da placa eletrónica vai desde os 6 a 20 V em tensão contínua e está regulada para ser alimentada a 12 V através de um carregador ligado permanentemente à fonte de tensão de 230 V.

Este carregador alimenta em paralelo a placa Arduino e uma bateria, de forma que os registos continuem a ser realizados em caso de falha de energia. A bateria tem capacidade para alimentar todo o sistema durante 24 horas, ver figura 3.8.

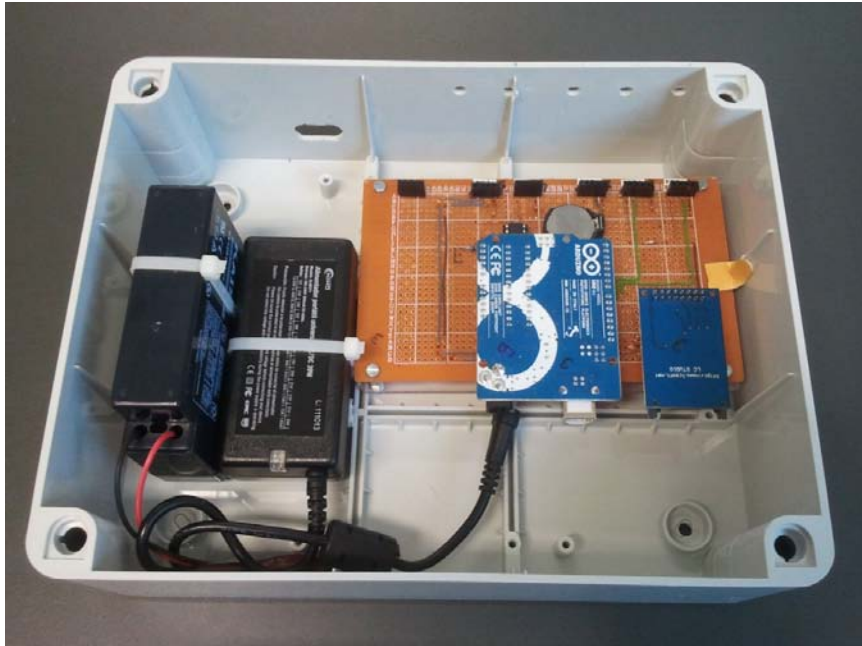


Figura 3.8 Unidade central de registro de dados.

Na figura 3.9 apresenta-se um diagrama de blocos da montagem do sistema de aquisição e armazenamento de medições.



Figura 3.9 Diagrama de blocos do equipamento de medida.

O sensor de leitura digital utilizado foi o DHT22 que realiza a leitura da temperatura e humidade relativa, sendo calibrados de fábrica, com boa estabilidade ao longo do tempo e apresentam um baixo consumo devido à utilização de um *driver* AM2303 de baixa potência. Estes sensores contemplam outras características importantes como a

velocidade de comunicação e o leque de leituras, que no caso da humidade relativa permite a leitura de 0 a 100 % e a temperatura de -40 a 125 °C, com uma tolerância de 2 % e 0.2 % respetivamente. A comunicação é realizada em modo digital o que permite a utilização de maiores distâncias e redução de interferências eletromagnéticas, ver figura 3.10.



Figura 3.10 Sensor de leitura digital.

3.10.3 Localização dos equipamentos de medida

A unidade central de aquisição e armazenamento dos valores das medições foi colocada junto do quadro de baixa tensão de modo a poder ser alimentada a partir de uma tomada de tensão de 230 V. A ligação entre a unidade central e os sensores foi realizada por intermédio de Cabo de Par Trançado - UTP selecionado pelas baixas interferências eletromagnéticas e por permitir um fácil roteamento para sua fixação na cabina. Os sensores foram colocados em cinco pontos da cabina considerados importantes, para obter os registos das leituras desses pontos indicados, como sendo:

- No interior ao nível do equipamento de MT.
- No exterior na fachada voltada a norte.
- Na parte superior da cuba de óleo do transformador de potência.
- Na abertura de entrada de ar junto ao transformador, do lado interior.
- Na abertura de saída de ar na parede oposta ao transformador, do lado interior.

O sensor colocado no exterior encontra-se protegido contra a incidência direta do sol e da chuva, através de montagem em caixa apropriada, ver figura 3.11. O sensor colocado no transformador e na abertura de entrada junto ao transformador foi

colocado durante uma intervenção programada de manutenção aos postos de transformação, sem tensão. Para este efeito, depois de realizado o procedimento interno e o pedido à condução para intervenção no posto de transformação, na data programada realizaram-se as manobras necessárias de reconfiguração da rede e o posto de transformação ficou fora de serviço durante o período de intervenção. A zona alimentada por este posto de transformação passou a ser alimentada por intermédio de um gerador auxiliar ligado à saída do quadro de BT evitando o corte no fornecimento de energia aos clientes ligados naquele ponto.

Na unidade central, cada cabo de ligação aos sensores está identificado e a sua ordem de ligação à unidade segue a seguinte sequência:

- Sensor interior, leitura Temperatura Interior - T_i e Humidade Interior - H_i .
- Sensor exterior, leitura Temperatura Exterior - T_e e Humidade Exterior - H_e .
- Sensor transformador, leitura Temperatura Transformador Potência - T_{TP} .
- Sensor entrada, leitura Temperatura Entrada - T_{ent} e Humidade Entrada - H_{ent} .
- Sensor saída, leitura Temperatura Saída - T_{sai} e Humidade Saída - H_{sai} .



Figura 3.11 Equipamento de medida e sensores interior e exterior da cabina.

CAPÍTULO 4

VENTILAÇÃO NATURAL, TEMPERATURA E HUMIDADE NOS POSTOS DE TRANSFORMAÇÃO

4.1 Considerações gerais

A ventilação natural tem sido usada ao longo da história como meio de ventilar os mais variados tipos de estruturas. A sua utilização tem aplicações desde os edifícios habitacionais aos industriais sendo cada vez mais considerado a utilização deste efeito natural em conjunto com a ventilação forçada. Nalguns casos já é utilizada como único meio de refrigeração nos edifícios. A obtenção de temperaturas uniformes no interior dos edifícios pode ser conseguida pelo controlo da quantidade de ar fornecida ao interior [21].

Apesar de no período de inverno a preocupação primária estar relacionada com a forma de manter a temperatura no interior através da regulação de aberturas, no período de verão deve ser garantida a performance de ventilação com vista à refrigeração do transformador através do aumento do caudal de ar da ventilação. O ónus desta questão reside no facto de que a ventilação natural seja conseguida de uma forma satisfatória ao longo de todo o ano. O foco desta investigação tem em consideração os dois períodos, avaliando o padrão do caudal de ar criado pela ventilação natural e as implicações diretas com os níveis de temperatura e humidade na cabina dos postos de transformação.

Este capítulo apresenta os fundamentos da ventilação natural descrevendo os vários tipos de ventilação natural e aprofunda as características da ventilação natural através do efeito de chaminé ou Buoyancy, a ventilação sob efeito do vento e a combinação de ambos. É analisado o caudal gerado pela ventilação natural na cabina, a relação entre as grandezas temperatura e humidade, as implicações e efeitos secundários da humidade sobre o equipamento de MT e uma referência às cabinas pré-fabricadas.

4.2 Tipos de ventilação

Nos últimos anos, o tema da ventilação natural tem vindo cada vez mais a ser integrado com sistemas de ventilação forçada no projeto de edifícios aumentando o nível de complexidade e de controlo dos sistemas de ventilação. A ventilação está classificada em três tipos básicos a saber, ventilação natural, forçada e combinada. A evolução crescente das combinações de ventilação tem vindo a adotar cada vez mais sistemas de modo misto, sendo também referidos como híbridos ou sistemas naturalmente assistidos [22]. Neste estudo aprofunda-se o tema da ventilação natural.

4.3 Ventilação natural

Existem dois princípios que originam a ventilação natural, o princípio da ventilação por efeito de chaminé ou Buoyancy e a ventilação por efeito do vento. Embora estes efeitos possam existir individualmente, o mais comum é que estes dois se encontrem juntos na ventilação natural em que um pode ter predominância sobre o outro. Estes dois efeitos vão ser descritos individualmente e quando em conjunto na ventilação natural dos postos de transformação [22].

4.3.1 Ventilação devido ao efeito de chaminé ou Buoyancy

A ventilação natural devido ao efeito de Buoyancy é originada pela diferença de pressão criada dentro da cabina. Neste tipo de ventilação a diferença de pressão é resultante da diferença de densidade do ar no seu interior que tem como origem a diferença de temperatura. A magnitude da diferença de temperatura em conjunto com as características das aberturas originam um caudal de ar no interior da cabina. O impacto do efeito de chaminé é tanto maior quanto maior for a diferença de pressão e aumenta com a distância da altura entre as aberturas de entrada e saída de ar na cabina.

A uma determinada altura no interior da cabina é criada uma linha neutra de pressão que representa o equilíbrio entre a pressão existente no interior e a pressão no exterior. A essa altura se existirem aberturas de ventilação, não há circulação de ar entre o

interior e exterior. Acima ou abaixo da linha neutra a circulação e direção de ar podem ser determinadas, sendo a direção da circulação sempre da região de pressão superior para a inferior. Este plano neutro pode ser calculado com base nas áreas de entrada e saída do ar, da sua respetiva resistência à passagem do ar e da diferença de altura entre as aberturas [23].

A aplicação da equação de Bernolli para derivar o caudal de ar criado pelo efeito de chaminé, permite o cálculo da diferença de pressão devido à altura, isto é, a pressão hidrostática, para o ambiente interior e exterior. A diferença de pressão total entre o interior e o exterior pode então ser expressa em termos da diferença de altura, constante de gravidade, densidade do ar e das temperaturas interior e exterior [24]. A equação de Bernoulli quando aplicada aos fluidos é representada pela expressão matemática (4.1) [25]:

$$\frac{v_0^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz_0 = \text{constante} \quad (4.1)$$

Para o caso da ventilação por efeito de chaminé, não há nenhuma atuação sobre a velocidade externa e a equação fica reduzida à expressão (4.2):

$$\frac{p}{\rho} + gz_0 = \text{constante} \quad (4.2)$$

Sendo:

v_0 - velocidade do ar pela abertura [m/s];

p - pressão do ar na abertura [Pa];

ρ - massa específica do ar [kg/m³];

g - aceleração da gravidade [m/s²];

z_0 – nível de altura referenciada [m].

A diferença de pressão entre o ambiente exterior e interior tem a forma das expressões (4.3) e (4.4) e resultam da diferença de pressão considerada para uma determinada altura relativamente a uma origem.

$$\Delta P_e = \rho_e g(z_H - z_0) \quad (4.3)$$

$$\Delta P_i = \rho_i g(z_H - z_0) \quad (4.4)$$

Onde:

ΔP_e - diferença de pressão aplicada ao exterior [Pa];

ΔP_i - diferença de pressão aplicada ao interior [Pa];

ρ_e - densidade do ar referenciado ao exterior [kg/m³];

ρ_i - densidade do ar referenciado ao interior [kg/m³];

z_H - nível de altura considerada [m];

z_0 - nível de altura referenciada [m].

Para determinar a diferença de pressão total, ou seja, a diferença de pressão ao nível das aberturas de entrada e saída da cabina, obtém-se a expressão matemática (4.5):

$$(P_{i,H} - P_{e,H}) - (P_{e,0} - P_{i,0}) = gH(\rho_e - \rho_i) \quad (4.5)$$

Em que:

$P_{i,H}$ - pressão interior à altura H [Pa];

$P_{e,H}$ - pressão exterior à altura H [Pa];

$P_{i,0}$ - pressão interior à altura de referência [Pa];

$P_{e,0}$ - pressão exterior à altura de referência [Pa];

H - distância entre a altura referência e considerada [m].

O resultado da expressão (4.5) ilustra o que sucede na figura 4.1.

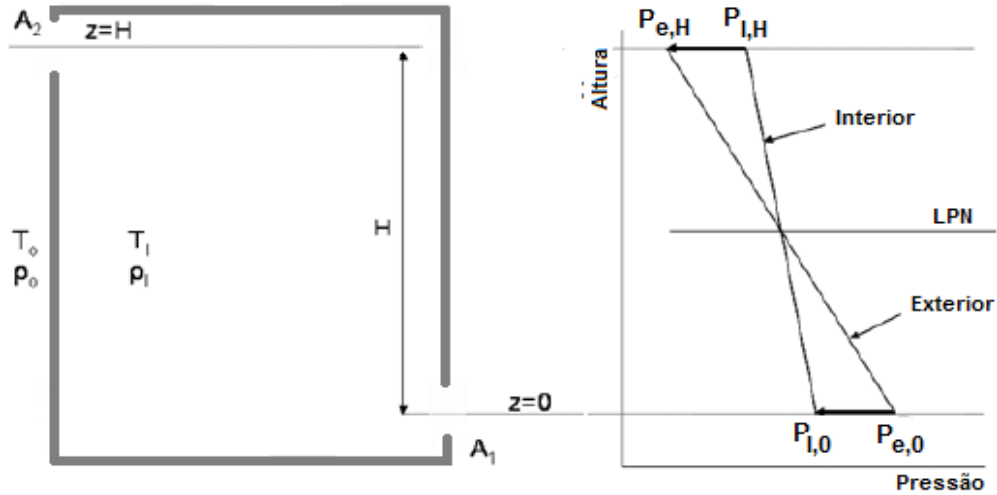


Figura 4.1 Linha de pressão neutra devido ao efeito de chaminé ou Buoyancy.

Assume-se que o ar é um gás perfeito e desta forma pode-se usar a lei dos gases perfeitos sendo expressa pela equação (4.6):

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (4.6)$$

Onde:

P – pressão [Pa];

R - constante dos gases perfeitos [J/kg K];

T – temperatura [°C].

A equação (4.6) substitui-se na equação anterior (4.5) em função da densidade do ar referenciado ao exterior e densidade do ar referenciado ao interior. Como a diferença de pressão entre exterior e interior é reduzida, comparando com a pressão atmosférica, o termo P/RT é movido para fora do parentesis e a lei do gás ideal novamente aplicado. Então, a equação que descreve a diferença de pressão devido ao efeito chaminé em função da temperatura interior e temperatura exterior, assume a expressão (4.7):

$$\Delta P = \rho_e g H \left(\frac{T_i - T_e}{T_i} \right) \quad (4.7)$$

Sendo:

ΔP - diferença de pressão [Pa];

T_i - temperatura interior [°C];

T_e - temperatura exterior [°C].

A aproximação de Boussinesq é também usada para gases ideais. A diferença de densidades são desprezadas na aproximação de Boussinesq à exceção da determinação da diferença de pressão total, devido à densidade do ar não variar significativamente com a temperatura no leque de temperaturas referência encontradas na cabina. A aproximação de Boussinesq é geralmente válida em temperaturas para $\Delta T < 30$ °C [24].

O caudal de ventilação pode então ser expresso por (4.8) e através da aproximação de Boussinesq por substituição da equação (4.7), obtém-se finalmente a expressão (4.9):

$$Q = C_d A \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (4.8)$$

$$Q_B = C_d A \sqrt{2 g H \frac{T_i - T_e}{T_i}} \quad (4.9)$$

Onde:

Q - caudal de ar [m³/s];

Q_B - caudal resultante do efeito de Buoyancy [m³/s];

C_d - coeficiente de descarga;

A - área das aberturas de entrada e saída, que são consideradas iguais [m²];

Sempre que a ventilação natural é usada como meio de ventilação sob o efeito de Buoyancy o caudal de ar não é assistido com ar forçado do exterior, por força do vento ou sistemas mecânicos e esta é muitas vezes considerada uma situação crítica, durante os meses mais quentes.

No caso da circulação de ar devido ao efeito de Buoyancy, os parâmetros a seguir descritos são interdependentes, tornando a análise deste tipo de ventilação mais complexa:

- O tamanho das aberturas de entrada e saída.
- A altura do espaço entre as aberturas.
- A quantidade de calor libertada pela fonte de calor no interior.
- A resultante da diferença de temperatura entre o espaço interior e exterior devido à fonte de calor.

4.3.2 Ventilação devido ao efeito do vento

A ventilação natural é influenciada por várias condições ambientais, das quais a mais imprevisível é o vento, devido à sua constante variação de velocidade e direção. Estes dois fatores são de difícil controlo e análise especialmente à escala real das cabinas. A cada momento a velocidade do vento sofre variações que influenciam as diferenças de pressões à volta da cabina.

Com estas variações os cálculos para a ventilação sob efeito do vento são realizados tendo em consideração uma velocidade de vento constante, que é obtida pela média da sua velocidade registada numa determinada localização. Os registos são obtidos durante um largo período realizado ao longo de anos [26].

Uma série de equações foram desenvolvidas para descrever a diferença de pressão devido à influência do vento nas cabinas, na grande maioria considera-se que a velocidade do vento tem valor constante e que a pressão não sofre variações ao longo do tempo.

A diferença de pressão estática através de uma abertura com uma determinada área devido à influência do vento é dada pela força da vazão do ar por essa abertura. A equação de Bernoulli aplicada num ponto da abertura é dada pela expressão (4.10):

$$P_V = \frac{1}{2} C_p \rho_e V_0^2 \quad (4.10)$$

Onde:

P_V - pressão devido ao vento na fachada [Pa];

V_0 - velocidade do vento a uma altura de referência [m/s];

C_p - coeficiente de pressão estática.

O coeficiente de pressão estática pode ser obtido por medições de pressão em tuneis de vento onde se utiliza um modelo de escala reduzida idêntico ao tipo de cabina ou através de componentes de medida de pressão localizados na cabina já existente, (tabela 4.1). Para a determinação do coeficiente de pressão num determinado ponto da cabina deve-se ter em consideração [27]:

- A geometria da cabina;
- A velocidade do vento;
- A exposição da cabina, ou seja, a sua localização relativamente a outros edifícios e a topografia do terreno na direção do vento.

O coeficiente de pressão estática é definido pela equação (4.11):

$$C_p = \frac{(p_p - p_0)}{0.5 \rho_e V_0^2} \quad (4.11)$$

Em que:

p_p - pressão estática num ponto da cabina [Pa];

p_0 - pressão estática a uma altura referência [Pa].

A distribuição de pressão é determinada pela geometria da cabina, a velocidade do vento e a forma como a cabina está exposta aos ventos predominantes.

A face da cabina voltada ao vento é sujeita a um coeficiente de pressão positivo, resultado do impacto do vento e sua deflexão na superfície.

A cobertura e a face oposta ao vento são sujeitas a um coeficiente de pressão negativo, devido à camada fronteira de separação da superfície da cobertura com a superfície das paredes laterais e da parede oposta ao vento.

O coeficiente de pressão nas paredes laterais da cabina pode ter valor positivo ou negativo, dependendo da orientação da cabina relativamente ao vento predominante.

A figura 4.2 mostra a distribuição típica do coeficiente de pressão numa cabina de cobertura plana, quando sujeita à incidência do vento numa das fachadas.

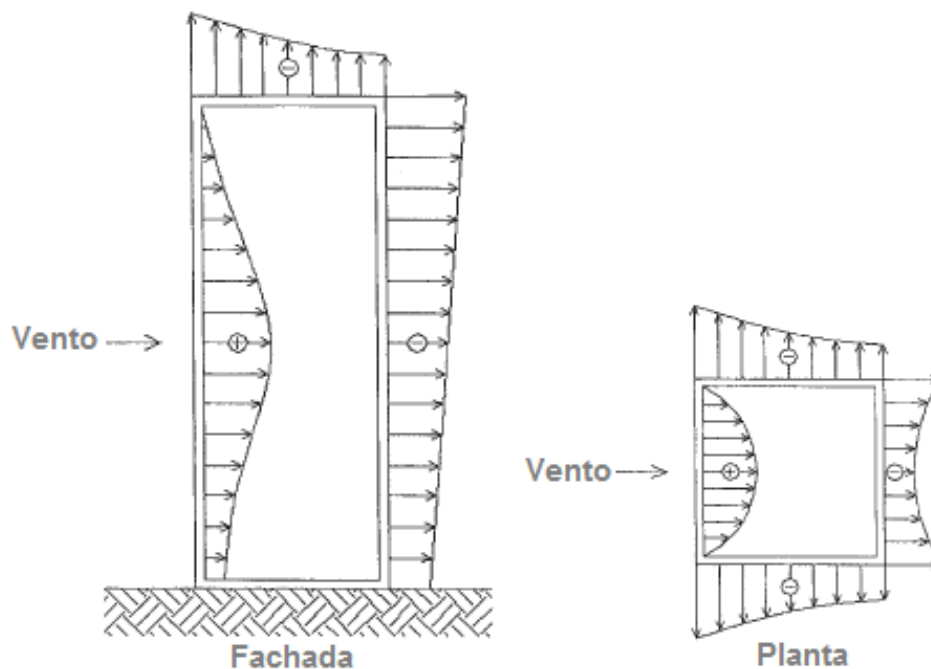
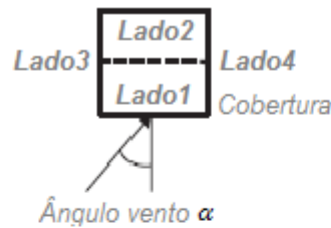


Figura 4.2 Distribuição do coeficiente de pressão em edifício com cobertura plana [26].

Tabela 4.1 Valores médios do coeficiente de pressão em zona urbana [26].



Fachada	Coeficiente de pressão, C_p , para o ângulo do vento, α							
	0	45	90	135	180	225	270	315
(a) Edifício exposto (terreno aberto)								
Lado1	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	-0.35
Lado2	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4
Lado3	-0.5	0.35	0.7	0.35	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4
Lado4	-0.5	-0.4	-0.2	-0.4	-0.5	0.35	0.7	0.35
Cobertura <10°:								
Frente	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
Trás	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5
Cobertura 11 ~ 30°:								
Frente	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7
Trás	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5
Cobertura >30°:								
Frente	0.3	-0.4	-0.6	-0.4	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4
Trás	-0.5	-0.4	-0.6	-0.4	-0.3	-0.4	-0.6	-0.4
(b) Edifício semi-abrigado (terreno aberto com intervalos de vento disperso abaixo da altura do edifício)								
Lado1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	-0.1
Lado2	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35
Lado3	-0.3	0.1	0.4	0.1	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35
Lado4	-0.3	-0.35	-0.2	-0.35	-0.3	0.1	0.4	0.1
Cobertura <10°:								
Frente	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5
Trás	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5	-0.6	-0.5	-0.4	-0.5
Cobertura 11 ~ 30°:								
Frente	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45
Trás	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45	-0.35	-0.45	-0.55	-0.45
Cobertura >30°:								
Frente	0.3	-0.5	-0.6	-0.5	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5
Trás	-0.5	-0.5	-0.6	-0.5	-0.3	-0.5	-0.6	-0.5
(c) Edifício com localização urbana (rodeado de edifícios de alturas iguais)								
Lado1	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	-0.05
Lado2	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3
Lado3	-0.25	0.05	0.2	0.05	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3
Lado4	-0.25	-0.3	-0.25	-0.3	-0.25	0.05	0.2	0.05
Cobertura <10°:								
Frente	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5
Trás	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5	-0.5	-0.5	-0.4	-0.5
Cobertura 11 ~ 30°:								
Frente	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
Trás	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
Cobertura >30°:								
Frente	0.25	-0.3	-0.5	-0.3	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3
Trás	-0.4	-0.3	-0.5	-0.3	0.25	-0.3	-0.5	-0.3

A pressão externa sobre uma abertura na fachada da cabina tem como resistência à passagem do caudal de ar, a pressão existente no interior. Numa cabina com duas aberturas em paredes opostas, se considerar que o ar entra numa abertura devido à pressão do vento (C_p positivo) e sai pela abertura oposta (C_p negativo), então por substituição da expressão (4.10) na expressão (4.8), o caudal de ar pelas aberturas pode ser determinado pela expressão (4.12) que se reduz à expressão (4.13):

$$Q = C_d A V_0 \sqrt{\Delta C_p} \quad (4.12)$$

Ou seja:

$$Q_V = C_d A V_0 \sqrt{C_{p1} - C_{p2}} \quad (4.13)$$

Onde:

Q_V - caudal resultante do efeito do vento [m^3/s];

C_{p1} - coeficiente de pressão na fachada com a abertura de entrada;

C_{p2} - coeficiente de pressão na fachada com a abertura de saída;

ΔC_p - variação do coeficiente de pressão.

A figura 4.3 mostra a ventilação devido ao efeito do vento, a direção do caudal e a resultante de pressões em relação à altura do edifício.

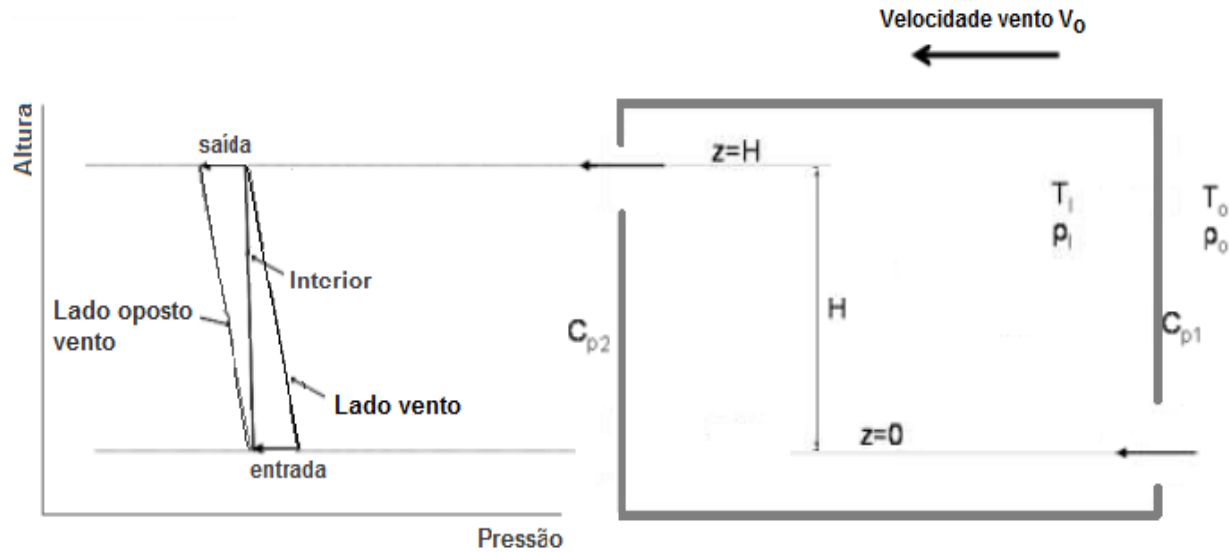


Figura 4.3 Ventilação pelo efeito do vento.

No caso de $C_{p1} > C_{p2}$ resultante da pressão do vento na fachada representado pela figura 4.3, o caudal de ar pelo interior da cabine tem valor positivo e sua direção é a do vento.

Se $C_{p1} < C_{p2}$ que corresponde a ação do vento no sentido contrario ao indicado na figura 4.3, então o caudal de ar pelo interior da cabine tem valor negativo e o seu sentido é contrario.

4.3.3 Ventilação devido à combinação do vento e Buoyancy

A ventilação por combinação do efeito do vento e Buoyancy é o tipo de ventilação que ocorre com maior frequência nas cabinas e estes dois tipos de ventilação natural podem funcionar em conjunto ou em oposição.

A figura 4.4 representa a direção do caudal e relação de pressão versus a altura para a combinação destes dois efeitos.

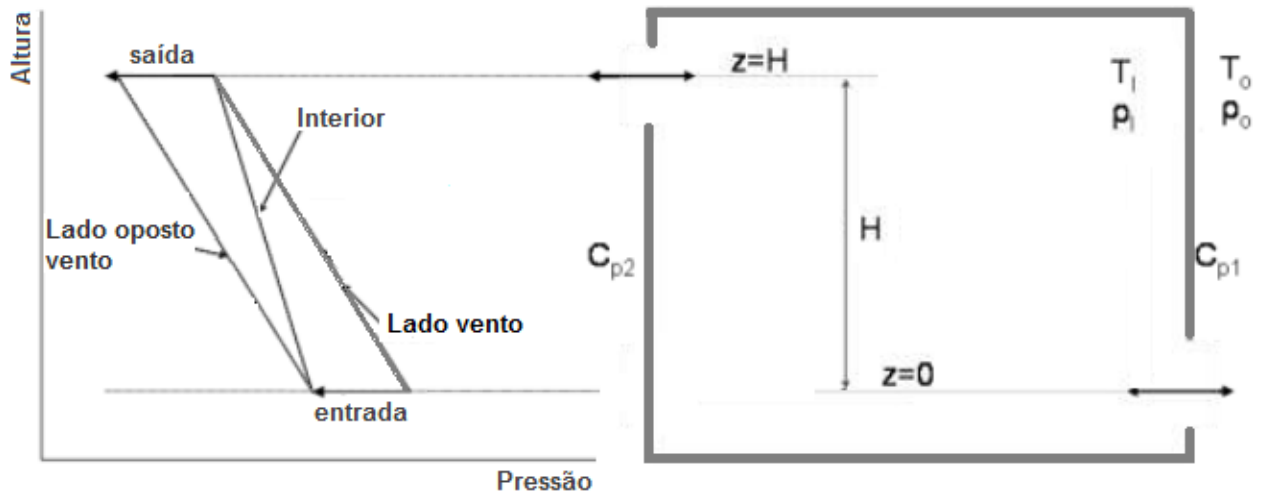


Figura 4.4 Combinação dos efeitos do vento e Buoyancy.

Para determinar a pressão total através de uma abertura são somadas as pressões relativas a cada um dos efeitos, resultando na equação (4.14):

$$\Delta P_T = \Delta P_V + \Delta P_B \quad (4.14)$$

Em que:

ΔP_T - diferença de pressão total [Pa];

ΔP_V - diferença de pressão devido ao efeito do vento [Pa];

ΔP_B - diferença de pressão devido ao efeito de Bouyancy [Pa].

O caudal total através de uma abertura pode ser calculado pela expressão (4.15):

$$Q_T = C_d A \sqrt{2 \frac{\Delta P_T}{\rho}} \quad (4.15)$$

Substituindo a diferença de pressão total devido a cada um dos efeitos da expressão (4.14) na expressão (4.15), obtém-se o caudal total através da expressão (4.16):

$$Q_T = C_d A \sqrt{V_0^2 \Delta C_p + 2gH \frac{T_i - T_e}{T_i}} \quad (4.16)$$

Ou seja:

$$Q_T = (Q_V^2 + Q_B^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

Onde:

Q_T - caudal total devido ao efeito do vento e Buoyancy [m^3/s].

Quando $Q_B > Q_V$ o efeito de Buoyancy prevalece e o caudal de ar pelo interior da cabina segue o sentido da abertura ao nível $z=0$ para a abertura ao nível $z=H$.

Se $Q_B \ll Q_V$ o caudal no interior da cabina tem a direção do vento, considerando que é perpendicular a uma das aberturas. Estudos sobre este tema mostram que para velocidades do vento pequenas na ordem de alguns metros por segundo o efeito de Buoyancy é desprezado relativamente ao efeito do vento [26].

4.4 Dissipação de calor por condução e transferência na cabina

O tipo e espessura de material utilizado na construção da cabina têm a sua contribuição na dissipação de calor produzido no seu interior. Verifica-se que a dissipação de calor pelas paredes e cobertura representa geralmente um valor baixo, quando comparado com a dissipação de calor do caudal de ar originado pela ventilação natural. Neste trabalho estas perdas são tidas em consideração devido a situações onde a ventilação é demasiadamente alta e o objetivo é conservar o calor. Este tipo de perdas tem alguma influência nas condições de temperatura e humidade relativa. Neste sentido, ao numerador da expressão (3.16) que representa as perdas totais no transformador, deve ser deduzido o valor das perdas de calor devido à condução e transferência pelas paredes e cobertura da cabina.

A representação das perdas pelas paredes e cobertura segue a expressão (4.18) [28]:

$$Q_{PC} = (0.7A_P K_P \Delta T + A_C K_C \Delta T) \times 10^{-3} \quad (4.18)$$

Onde:

Q_{PC} – perdas pela parede e cobertura [W];

A_P - área da superfície de parede [m²];

A_C - área da superfície da cobertura [m²];

K_P - coeficiente de transmissão térmica da parede [W/m² °C];

K_C - coeficiente de transmissão térmica da cobertura [W/m² °C].

O valor do coeficiente de transmissão térmica, considerado para uma espessura de parede e cobertura está indicado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 Coeficiente de transferência térmica em função da espessura [28].

Material	Espessura [cm]	Coeficiente de Transmissão Térmica [W/m ² °C]
Tijolo	10	3.1
	20	2.2
	30	1.7
Betão forte	10	4.1
	20	3.4
	30	2.8
Metal	--	6.50

Em cabinas pré-fabricadas o dimensionamento das aberturas deve contemplar as perdas de calor pela estrutura da cabina, o coeficiente de transmissão térmica da estrutura tem um valor bastante alto quando comparado com o coeficiente de transmissão térmica na cabina em alvenaria.

4.5 Efeitos da temperatura e humidade

A temperatura e humidade relativa são duas grandezas importantes a ter em conta na análise desta investigação. Dependendo da sua correlação e evolução no interior da cabina dos postos de transformação, influenciam a durabilidade dos equipamentos de MT. Valores continuados de humidade elevados influenciam o comportamento do equipamento do ponto de vista funcional, durabilidade, e da qualidade de serviço prestado [29].

4.5.1 Relação entre temperatura e humidade relativa

A temperatura é uma grandeza física que mede a energia cinética das partículas de um sistema em equilíbrio térmico e a humidade é um termo definido para descrever a presença de vapor de água no ar que pode ser descrito quantitativamente das seguintes formas [30]:

- Humidade absoluta HA , que representa a massa de vapor de água por unidade de volume. As variações de pressão e temperatura podem alterar o volume sem a variação de vapor de água, sendo por esta razão difícil de medir o conteúdo de vapor de água numa massa de ar móvel.
- Razão de mistura W , relaciona a massa de vapor de água com a massa de ar seco, também de difícil medição.
- Humidade específica HE , representa a massa de vapor de água por unidade de massa de ar, de utilização pouco prática.
- Humidade relativa HR , representa a razão entre a quantidade de vapor de água numa determinada porção de atmosfera W com a quantidade total de vapor de água que essa atmosfera pode suportar W_s , a determinada temperatura. Esta relação é dada pela expressão (4.19):

$$HR = \frac{W}{W_s} 100\% \quad (4.19)$$

Onde:

HR - humidade relativa [%];

W - quantidade de vapor de água [g/kg];

W_s - quantidade total de vapor de água de saturação [g/kg].

A humidade relativa indica quanto próximo o ar está da saturação, a quantidade de vapor de água necessária para atingir a saturação depende da temperatura, o valor da humidade relativa varia com estas duas grandezas, conforme indicado nas figuras 4.5 e 4.6.

O valor da humidade relativa sobe com o aumento da quantidade de vapor de água, considerando uma unidade de volume de ar, com uma temperatura constante.

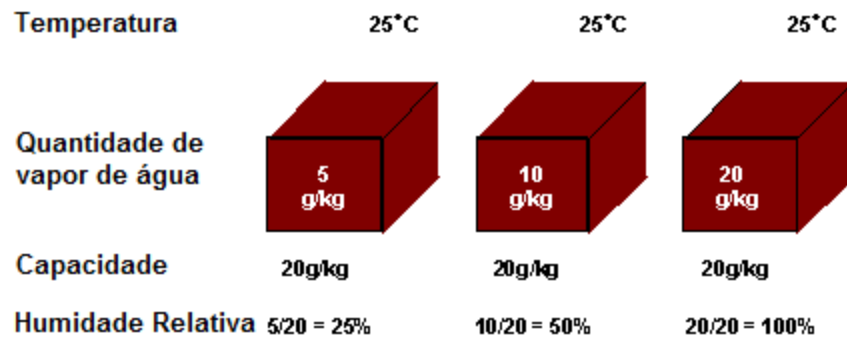


Figura 4.5 Variação da humidade relativa com concentração de vapor de água [31].

O valor da humidade relativa desce com o aumento da temperatura, considerando uma unidade de volume de ar com quantidade de vapor de água constante.

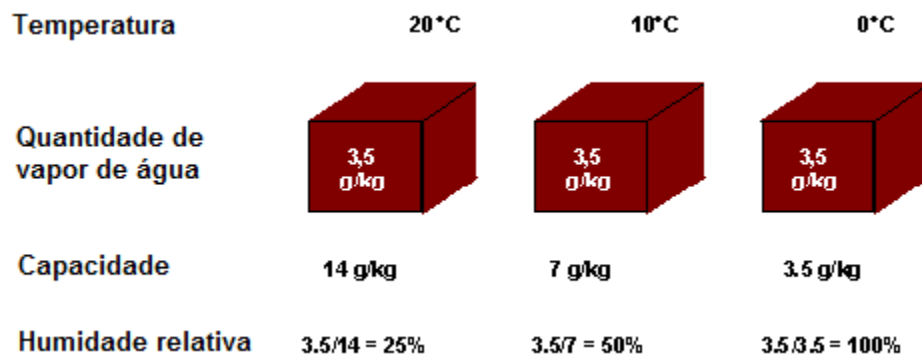


Figura 4.6 Variação da humidade relativa com variação da temperatura [31].

O efeito pode-se verificar se considerar um ciclo diário de 24 horas onde durante a noite a descida da temperatura origina um aumento de humidade e durante o dia com a subida de temperatura provoca a diminuição da humidade relativa do ar, ver figura 4.7.

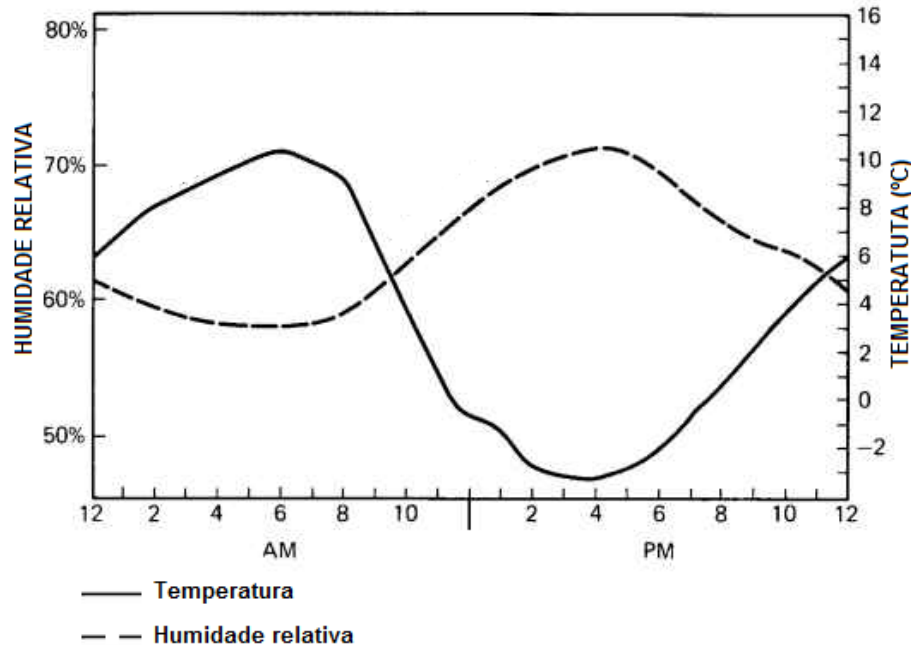


Figura 4.7 Variação da humidade relativa durante um dia [31].

A variação da temperatura e humidade relativa é de grande importância no interior da cabina dos postos de transformação, visto que, como existem aberturas para entrada e saída de ar, as condições mais adversas do exterior influenciam a temperatura e humidade relativa no interior.

O ponto de orvalho, que representa a temperatura a que o ar deve ser arrefecido para ficar saturado a pressão constante, as variações de temperatura no interior da cabina podem atingir o ponto de orvalho.

O valor da temperatura para que o ponto de orvalho possa ser atingido é dado pela expressão (4.20) [32]:

$$T_{PO} = T - \frac{100 - HR}{5} \quad (4.20)$$

Onde:

T_{PO} - temperatura de ponto de orvalho [°C];

O cálculo analítico do ponto de orvalho envolve a utilização de fórmulas mais complexas e precisas ou a utilização e consulta de gráficos psicométricos. Através da expressão prática (4.20), a temperatura do ponto de orvalho pode ser facilmente conhecida com boa precisão para valores de humidade relativa acima de 50 %. Considerando as condições da figura 4.6, com uma temperatura de 10 °C e humidade relativa de 50 % a temperatura do ponto de orvalho é atingida aos 0 °C.

Verifica-se que quanto maior for a concentração de vapor de água por unidade de volume, mais alto é o valor do ponto de orvalho. Estas condições são atingidas com maior facilidade durante o período de inverno com temperaturas mais baixas.

4.5.2 Influência da humidade no equipamento de média tensão

O isolamento do equipamento de média tensão nos postos de transformação utiliza isoladores de resina *epoxy*. Em condições normais de serviço o material dos isoladores tem um bom comportamento. No entanto, os períodos prolongados com elevados níveis de humidade conduzem à redução do seu tempo de vida, devido à redução das suas propriedades mecânicas e elétricas e originam o aparecimento de descargas parciais e efeitos de coroa nos isoladores [33].

Os valores de humidade podem ser influenciados pela vegetação circundante à cabina, chuva e infiltrações de água pela cobertura ou através dos canais de entrada e saída dos cabos subterrâneos [34].

No interior da cabina, valores de temperaturas baixos dão origem a valores altos de humidade, especialmente durante o período de inverno.

Nestas condições as variações de temperatura podem conduzir à formação de orvalho. Este efeito consegue-se eliminar com recurso a aquecimento adicional através de radiadores, que funcionam de uma forma constante evitando assim as variações de

temperatura, só utilizado em casos extremos, ou aumentar o nível de isolamento térmico da cabina, o que em postos de transformação já construídos seria de difícil e dispendiosa execução.

Idealmente é desejável atingir um equilíbrio entre estas duas grandezas no interior da cabina, onde a influência dos fatores climatéricos externos seja mínima nas condições do interior.

4.5.3 Descargas parciais

Tecnicamente as descargas parciais são descargas elétricas em forma de arcos, faíscas ou fluxos de corrente que ocorrem ao longo de um sistema de isolamento de tensão e que não acontecem entre fase-terra ou fase-fase. Estes arcos, faíscas e fluxos de corrente assumem uma forma de ramificação chamados de *treeing* e dissipam-se através do ar.

Outro fenómeno que tem estreita relação com este e que é considerado como um tipo particular da descarga parcial, são as descargas por efeito de coroa. Este tipo de descarga elétrica ocorre entre dois pontos e resulta de uma forte concentração do campo elétrico que ioniza o ar circundante. O trilho da descarga elétrica parcial inicialmente ocorre e propaga-se quando um dielétrico seco está sujeito a uma grande tensão (*stress*) provocada pelo campo elétrico. Os pontos de tensão são pequenas regiões caracterizadas por pontos de impurezas, bolsas de ar, e defeitos mecânicos do isolador que ionizam o gás na superfície dessas pequenas bolsas dando origem a descargas parciais entre estes pontos.

As descargas parciais e efeitos de coroa provocam a ionização do ar que originam a produção de luz ultravioleta e gases como o ozono e dióxido de nitrogénio. O primeiro reage e acelera a degradação do material constituinte do isolador, o segundo combinado com altos valores de humidade originam reações químicas com produção de ácido nítrico que corroem as superfícies metálicas e ao mesmo tempo favorecem a condutividade elétrica na superfície dos isoladores acelerando ainda mais o processo.

Estes fenómenos dão origem ao aparecimento de odores típicos devido ao ozono produzido e de ruído em forma de zumbido devido as descargas parciais.

Estes tipos de descargas parciais no equipamento elétrico que aceleram a degradação progressiva do material isolante resultam em perdas na transmissão da energia elétrica. Uma vez começado este processo, as descargas parciais podem-se desenvolver durante alguns anos ou apenas em alguns meses originando a rotura total do isolamento, ver figura 4.8. Os principais fatores que contribuem para acelerar esta degradação são [35]:

- Valor de tensão nominal.
- Tamanho, forma e localização do defeito.
- Condições do ambiente, temperatura, humidade e nível de sujidade.
- Fatores mecânicos, a vibração.
- Tempo de serviço do equipamento.

Destes fatores, onde se pode ter uma ação efetiva é sobre o controlo das condições de temperatura e humidade relativa no interior da cabina.



Figura 4.8 Descargas parciais em equipamento de MT.

4.5.4 Poluição e sujidade

A qualidade do meio ambiente exterior às cabinas de ventilação natural tem forte influência nos fenómenos anteriormente referidos.

O caudal de ar gerado pela ventilação em locais onde os níveis de poluição industrial, poeiras ou salinidade sejam altos, originam maior sujidade depositada sobre os isoladores e restante equipamento favorecendo a criação dos trilhos para as descargas sob a forma de arcos, faíscas ou fluxos de corrente nos isoladores, que no extremo pode levar à sua quebra total.

Quando valores de humidade elevados ocorrem durante um período de tempo prolongado, facilita a criação daqueles trilhos e uma corrente de fuga percorre a superfície do isolador.

Devido ao aquecimento pelo efeito de Joule os trilhos ficam mais secos, o que limita a passagem da corrente de fuga. Como resultado, aparecem altas tensões nesses trilhos já pré-definidos, criando ainda mais descargas acompanhadas de maiores correntes de fuga.

A combinação do aumento da severidade da poluição com a humidade implica o aumento da amplitude das correntes de fuga, acompanhada pelo aumento da largura dos trilhos e comprimento dos arcos conduzindo à destruição do isolador, (figura 4.9) [36].

Ações planeadas de manutenção preventiva são muito importantes como forma de reduzir o impacto negativo da poluição e poeiras acumuladas no equipamento de MT.

Estas ações podem ser executadas com o equipamento em tensão ou de preferência com o equipamento fora de serviço, o que permite uma maior eficácia da intervenção realizada a todo o equipamento de MT no interior, grelhas de ventilação que estão sujeitas ao depósito de poeiras e ao pavimento no interior da cabina.

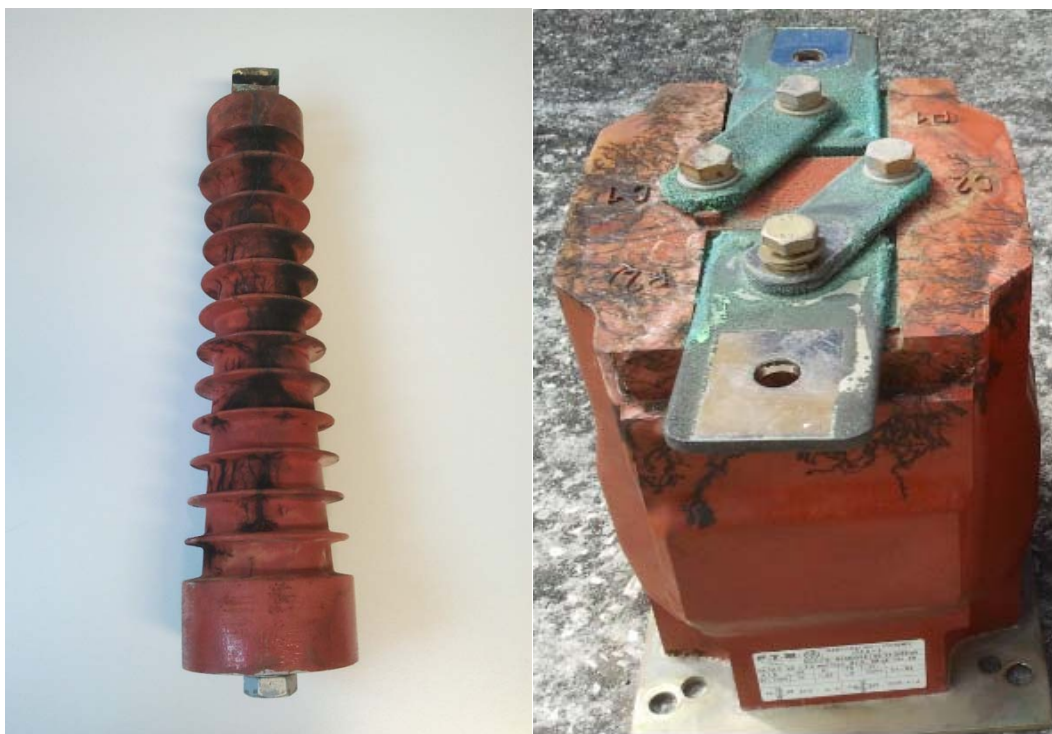


Figura 4.9 Efeitos das descargas parciais num isolador e num transformador de intensidade.

4.6 Cabinas pré-fabricadas

Foi referido no capítulo 1 ponto 1.1 que as cabinas do tipo pré-fabricado são hoje as mais utilizadas, estando preparadas para funcionar com um transformador de potência nominal até 630 kVA e são equipadas com blocos compactos com isolamento integral em SF_6 , normalmente designadas por duas funções em anel e uma função de proteção do transformador. Estão preparadas para funcionar com tensão nominal de 10, 15 ou 30 kV.

As cabinas pré-fabricadas podem ainda ser equipadas com sistema de telecomando constituído por uma Unidade Remota de Rede - URR e possuem quadro geral de baixa tensão do tipo R630 [37].

Os blocos compactos com isolamento integral são usados numa implementação cada vez maior, inclusive em postos de transformação onde o equipamento de MT com

isolamento de corte no ar apresenta estados de degradação avançado, procedendo-se nestes casos à sua substituição integral.

Os blocos compactos com isolamento integral apresentam grande vantagem sobre o equipamento de abertura no ar do ponto de vista funcional, tendo como desvantagem o seu custo elevado.

As cabinas pré-fabricadas quando equipadas com os blocos compactos de isolamento parcial apresentam problemas de corrosão e descargas parciais, devido a pontos nestes blocos que não são totalmente isolados, como é o caso das ligações dos cabos de MT aos terminais da cela, (figura 4.10).



Figura 4.10 Bloco compacto com isolamento parcial [38].

A função de abertura e fecho do circuito elétrico é realizada em ambiente fechado com gás SF_6 . A origem destes problemas está relacionada com as situações em que a

humidade no interior atinge valores altos, devido às aberturas de ventilação e canais subterrâneos de entrada e saída para passagem dos cabos de MT. Atualmente, na rede de distribuição, as cabinas com este tipo de equipamento deixaram de ser utilizados, dando lugar aos blocos compactos com isolamento integral.

As cabinas pré-fabricadas equipadas com os blocos compactos de isolamento integral apresentam melhores condições de funcionamento e durabilidade. Neste tipo de equipamento o sistema das ligações sofreu uma melhoria, as ligações dos cabos com os terminais do bloco encontram-se devidamente protegidas sem que haja contacto com o ar. A função de abertura e fecho do circuito elétrico continua a ser realizado em ambiente fechado com gás SF_6 . Este tipo de equipamento é bastante utilizado nas cabinas pré-fabricadas e em postos de transformação sujeitos a remodelações, (figura 4.11).



Figura 4.11 Pormenor da ligação em T dos cabos de MT aos terminais do bloco [39].

4.7 Normas de serviço das cabinas

A cabina dos postos de transformação segue condições de serviço de modo a evitar ou reduzir a degradação do equipamento de MT no seu interior, devido à exposição de altos níveis de humidade ou poluição. São consideradas condições normais de serviço quando as cabinas cumprem as seguintes condições [40]:

- Temperatura no interior, a temperatura do ar ambiente não deve exceder os +40 °C e o valor médio medido num período de 24 H não deve exceder os +35 °C. A temperatura mínima admissível é de -25 °C.
- Humidade no interior, o valor médio da humidade relativa medido num período de 24 H não deve exceder os 95 %, ou o valor médio da humidade relativa medido durante um mês, não deve exceder os 90 %.

Em situações normais de funcionamento o equipamento de MT deve alcançar o seu tempo de vida útil para o qual foi projetado. Um dos fatores que promove a velocidade de degradação do isolamento está relacionado com a exposição durante longos períodos a uma humidade relativa muito alta e a efeitos secundários decorrente da elevada humidade.

CAPÍTULO 5

ANÁLISE DA VENTILAÇÃO NO PERÍODO DE INVERNO E VERÃO

5.1 Considerações gerais

A análise das condições internas da cabina implica o conhecimento das variações da temperatura e humidade relativa através dos registos obtidos dos equipamentos de monitorização. Os dados foram analisados considerando dois períodos, o de inverno e o de verão.

Neste capítulo encontra-se descrita a análise realizada nos dois períodos para uma semana considerada típica com carga real, simulação com ação do vento, simulações para vários regimes de carga e simulações para transformador de potência 630 kVA com vários regimes de carga, que culminou na elaboração de uma tabela que apresenta a área da abertura de ventilação em função da carga e potência do transformador.

5.2 Análise do período de inverno

5.2.1 Análise de uma semana de inverno com carga real

Os dois postos de transformação selecionados para a realização desta análise tem implementado um sistema de telecontagem. Este sistema efetua a cada 15 minutos um registo da potência ativa e da potência reativa o que permite o cálculo da potência aparente e da carga do transformador.

O tratamento gráfico da informação registada no CB1 e CB2 na primeira semana de abril com chuva e temperatura exterior baixa, representa uma semana típica de inverno e permite a visualização do comportamento da temperatura e humidade relativa, combinada com a evolução do regime de carga do transformador, (figuras 5.1 e 5.2).

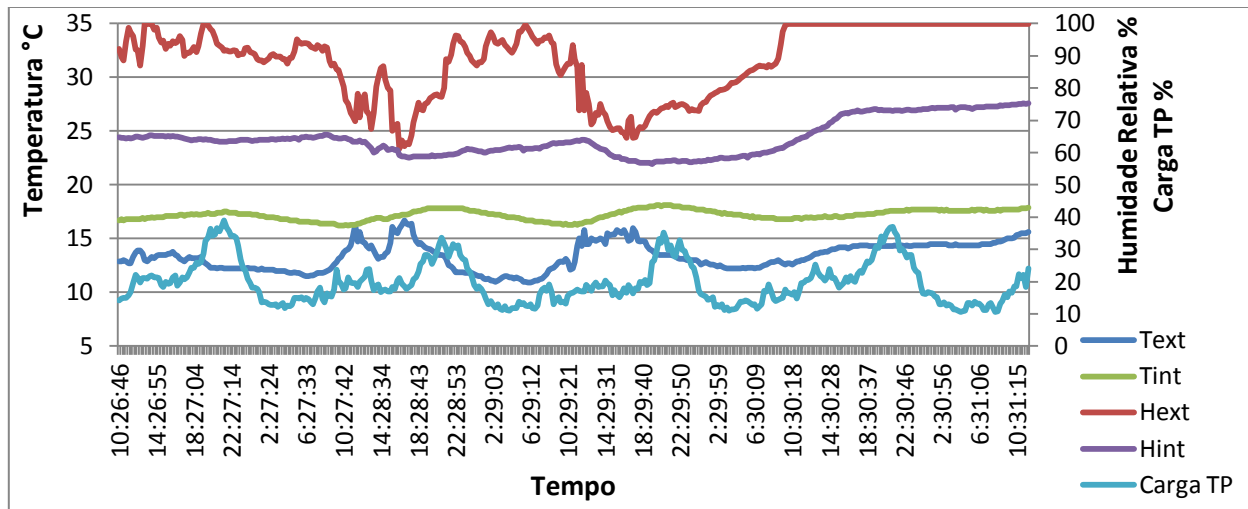


Figura 5.1 Dados obtidos do CB1 com regulação de aberturas em 80%, no inverno.

Verifica-se que no CB1 com as aberturas fechadas a 80 %, a temperatura no interior varia entre os 16 e 18 °C apresentando boa estabilidade ao longo do tempo, o que influencia diretamente a estabilidade da umidade relativa que tem valores entre os 56 e o máximo de 75 %. O valor máximo é atingido durante o período em que as condições climáticas no exterior apresentam uma grande percentagem de humidade. O regime de carga do transformador tem um valor médio de 20 % e a ponta de carga que coincide com os pontos de maior temperatura registada, contribuem para a estabilidade da temperatura verificada no interior da cabina.

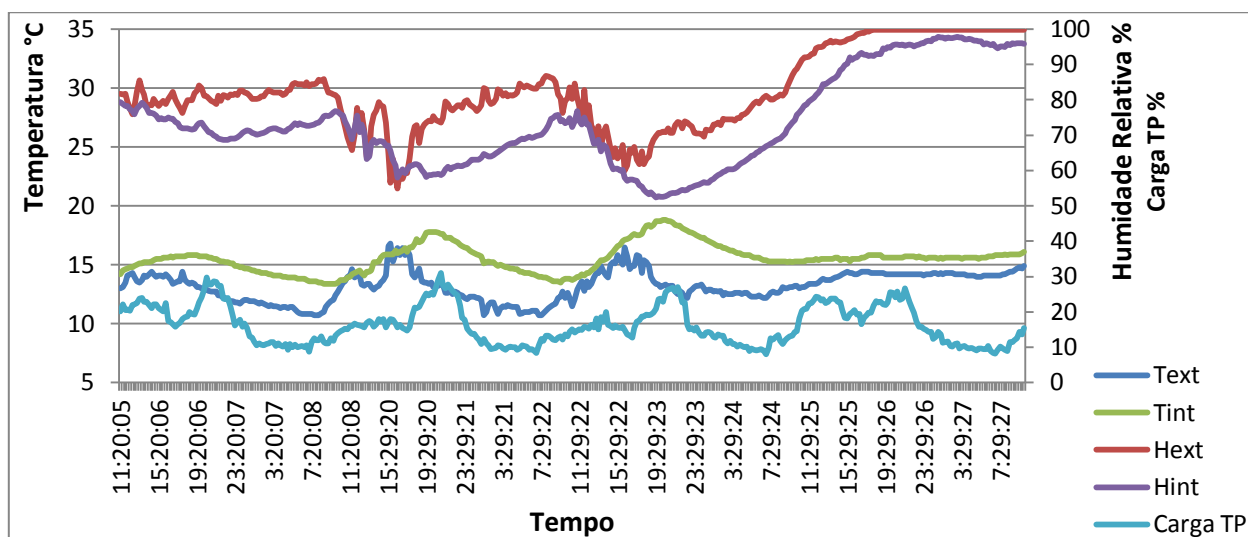


Figura 5.2 Dados obtidos do CB2 com aberturas no valor nominal, no inverno.

No CB2 com as aberturas no valor nominal, a variação da temperatura no interior tem uma maior oscilação com os valores a variar entre os 13 e 18 °C. Esta é mais influenciada pela variação da temperatura exterior. O regime de carga do transformador tem um valor médio de 16 % e as pontas de carga elevam a temperatura do interior para valores idênticos aos verificados no caso anterior. A humidade relativa também apresenta uma maior oscilação com valores entre 53 e 98 % e o seu valor médio é superior ao caso anterior. Verifica-se que a humidade relativa no interior atinge valores mais elevados quando no exterior também se atinge valores elevados.

Nos gráficos das figuras 5.1 e 5.2, verifica-se que sempre que a temperatura sobe no interior, provoca claramente uma diminuição do nível da humidade relativa, cujo valor se pretende que seja baixo.

No ponto de vista da análise da ventilação natural durante esta semana, podemos verificar que ao utilizar as médias dos valores registados, a realização de cálculos através da utilização das expressões (3.16), (4.9) e (418) apresenta resultados conforme indicado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 Comparação das condições de funcionamento do CB1 e CB2.

<i>PT</i>	<i>DATA</i>	T_i	T_s	ΔT	Q_{Diss}	Q_B	Q_{PC}
—	—	°C	°C	°C	m ³ /s	m ³ /s	kW
CB1	140405	17.2	13.34	3.86	0.080	0.123	0.49
CB2	140405	15.55	13.2	2.35	0.313	0.558	0.28

Verifica-se que em condições reais de funcionamento, a diferença do caudal de ventilação entre o caudal de ar necessário para a dissipação de calor no transformador Q_{Diss} e o caudal gerado pelo efeito de Buoyancy Q_B é menor para o caso do CB1 o que contribui para uma maior estabilidade da temperatura no interior da cabina.

5.2.2 Análise do efeito do vento

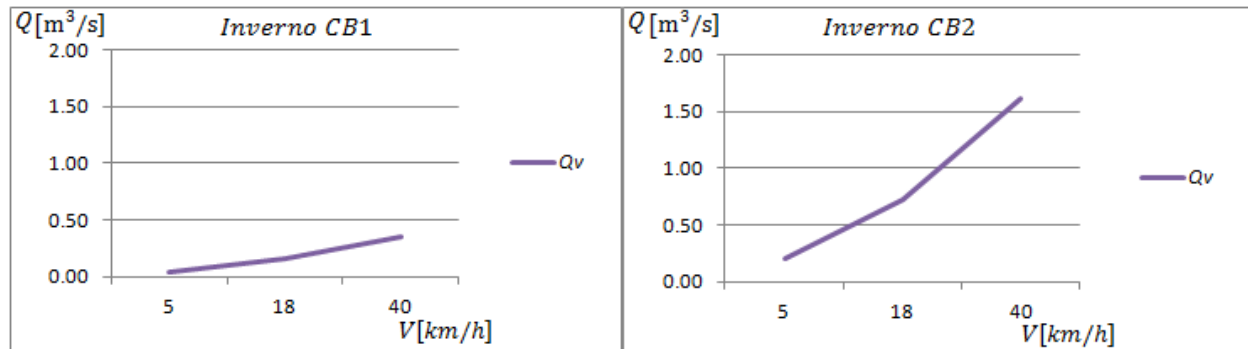
Como referido no capítulo 4 ponto 4.3.2, a ventilação devido ao efeito do vento é de difícil análise devido às constantes variações de velocidade e direção. Na tabela 5.2 apresenta-se os resultados da simulação da ação do vento sobre as cabinas dos dois

postos de transformação em análise, considerando que a direção do vento incide perpendicularmente à fachada da abertura de entrada e a sua velocidade é constante.

Tabela 5.2 Simulação da ventilação devido apenas a ação do vento.

PT	V	V_0	A_1	A_2	C_{p1}	C_{p2}	Q_v
—	km/h	m/s	m^2	m^2	—	—	m^3/s
$CB1$	5	1.39	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.045
$CB1$	18	5.00	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.161
$CB1$	40	11.11	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.358
$CB2$	5	1.39	0.36	0.36	0.20	-0.25	0.201
$CB2$	18	5.00	0.36	0.36	0.20	-0.25	0.724
$CB2$	40	11.11	0.36	0.36	0.20	-0.25	1.610

Verifica-se que o caudal de ar produzido pela ação do vento no CB2 é bastante superior ao caudal produzido no CB1, devido às aberturas do CB2 estarem no seu valor nominal e mais sujeito a ação do vento. Os valores obtidos nesta simulação podem ser visualizados nas figuras 5.3 a) e 5.3 b).



a)

b)

Figura 5.3 a) e b) Simulação da ação do vento no CB1 e CB2.

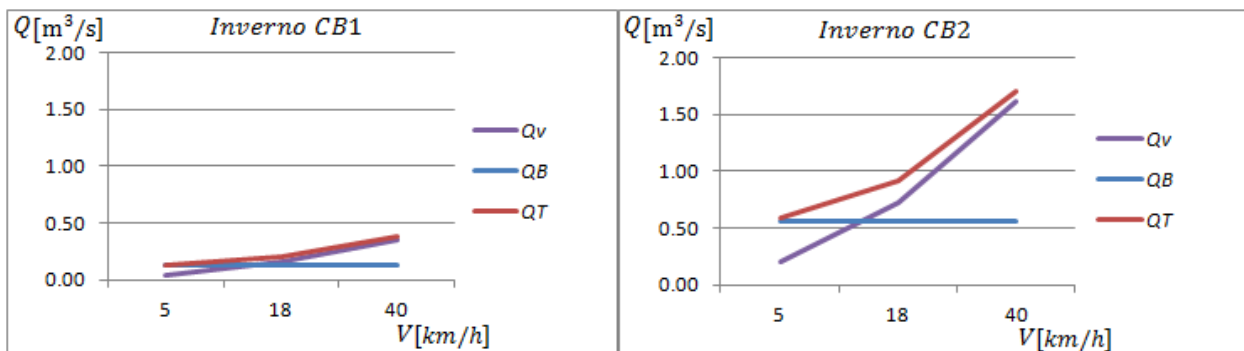
5.2.3 Análise do efeito do vento e Buoyancy

Do capítulo 4 ponto 4.3.3, a combinação destes dois tipos de ventilação ocorre com maior frequência e pode funcionar em conjunto ou em oposição. Na tabela 5.3 são representados os valores resultantes da simulação da ação do vento em conjunto com o cálculo do efeito de Buoyancy. Considera-se que a direção do vento incide perpendicularmente na fachada da abertura de entrada e tem velocidade constante.

Tabela 5.3 Simulação devido ao efeito do vento e Buoyancy.

PT	V	V_0	A_1	A_2	C_{p1}	C_{p2}	Q_V	Q_B	Q_T
—	km/h	m/s	m ²	m ²	—	—	m ³ /s	m ³ /s	m ³ /s
CB1	5	1.39	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.045	0.123	0.131
CB1	18	5.00	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.161	0.123	0.203
CB1	40	11.11	0.08	0.08	0.20	-0.25	0.358	0.123	0.378
CB2	5	1.39	0.36	0.36	0.20	-0.25	0.201	0.558	0.593
CB2	18	5.00	0.36	0.36	0.20	-0.25	0.724	0.558	0.914
CB2	40	11.11	0.36	0.36	0.20	-0.25	1.610	0.558	1.704

O caudal de ar total Q_T produzido devido aos dois efeitos aumenta significativamente sendo superior ao caudal gerado por cada um dos efeitos individualmente. Os valores obtidos nesta simulação podem ser visualizados nas figuras 5.4 a) e 5.4 b).



a)

b)

Figura 5.4 a) e b) Simulação da ação do vento e Buoyancy no CB1 e CB2.

Verifica-se que a ventilação produzida pelo efeito de Buoyancy apenas tem significado para valores baixos da velocidade do vento. O aumento da velocidade do vento tem maior influência no CB2, devido à ação do vento gerar maior pressão nas aberturas e a influência da ventilação pelo efeito de Bouyancy poder ser desprezada.

5.2.4 Simulação de aumento de carga nos transformadores no inverno

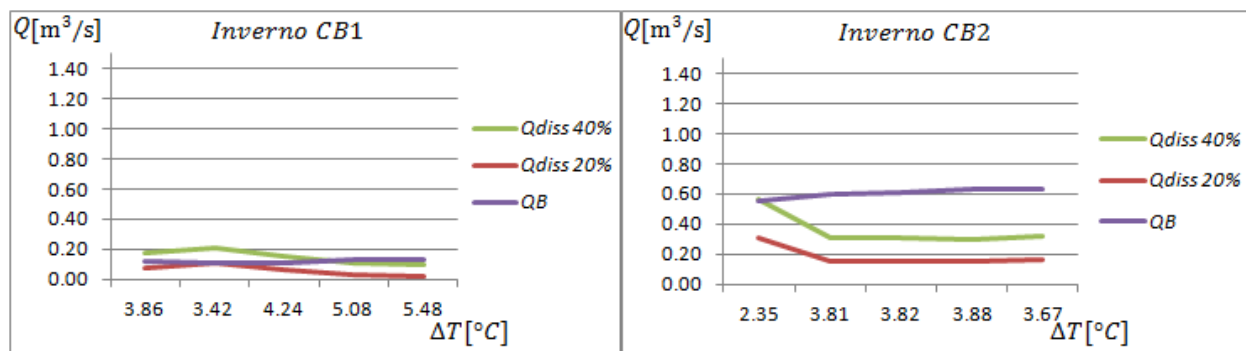
Pretende-se fazer uma análise comparativa do comportamento da ventilação entre os dois postos de transformação e realizar a simulação da subida do regime de carga dos transformadores de potência de 20 % até 80 %, tendo como base as condições reais registadas nas semanas consideradas como semanas de inverno.

Na tabela 5.4 são indicados os registos médios das temperaturas durante várias semanas obtidos do CB1 e CB2, os valores calculados para o regime de carga real de 20 % e também uma simulação dos valores calculados para uma subida no regime de carga dos transformadores para 40 %.

Tabela 5.4 Dados da carga real a 20 % e simulação para carga de 40 %, no inverno.

PT	DATA	T_i	T_e	ΔT	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_B	Q_{PC}
—	—	°C	°C	°C	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	kW
					20%	20%	20%	40%	40%	40%		
CB1	140405	17.2	13.34	3.86	0.08	0.052	88.54	0.18	0.114	74.62	0.123	0.49
CB1	140414	21.83	18.41	3.42	0.10	0.081	82.09	0.21	0.165	63.30	0.103	0.43
CB1	140421	22.66	18.42	4.24	0.06	0.044	90.11	0.15	0.107	76.24	0.113	0.54
CB1	140428	21.68	16.6	5.08	0.03	0.022	95.17	0.11	0.068	84.82	0.126	0.64
CB1	140526	21.23	15.75	5.48	0.02	0.014	96.80	0.09	0.056	87.67	0.132	0.69
CB2	140405	15.55	13.2	2.35	0.31	0.202	43.90	0.56	0.363	-0.75	0.558	0.28
CB2	140414	21.95	18.14	3.81	0.15	0.093	74.21	0.31	0.185	48.52	0.598	0.45
CB2	140421	21.35	17.53	3.82	0.15	0.091	74.71	0.31	0.182	49.47	0.607	0.45
CB2	140428	19.85	15.97	3.88	0.15	0.085	76.43	0.30	0.170	52.65	0.634	0.46
CB2	140526	19.11	15.44	3.67	0.16	0.094	73.94	0.32	0.185	48.57	0.629	0.43

A análise da tabela torna-se mais simples com observação gráfica dos valores do caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , conforme indicado nas figuras 5.5 a) e 5.5 b).



a)

b)

Figura 5.5 a) Carga real de 20 %, b) simulação para carga de 40 %, no inverno.

Verifica-se que no caso do CB1 o caudal produzido pelo efeito da ventilação natural Q_B é superior ao caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} com

carga a 20 %. A simulação para um regime de carga de 40 % apresenta um caudal necessário de dissipação superior ao caudal gerado pelo efeito Buoyancy, especialmente quando a diferença de temperatura ΔT é pequena, sendo aceitável manter a mesma regulação das aberturas para o aumento de carga.

No caso do CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy é superior ao caudal necessário para a refrigeração do transformador, para o regime de carga de 20 e 40 %, existe uma maior capacidade de refrigeração no CB2 relativamente ao CB1 devido às aberturas de ventilação estarem no valor nominal.

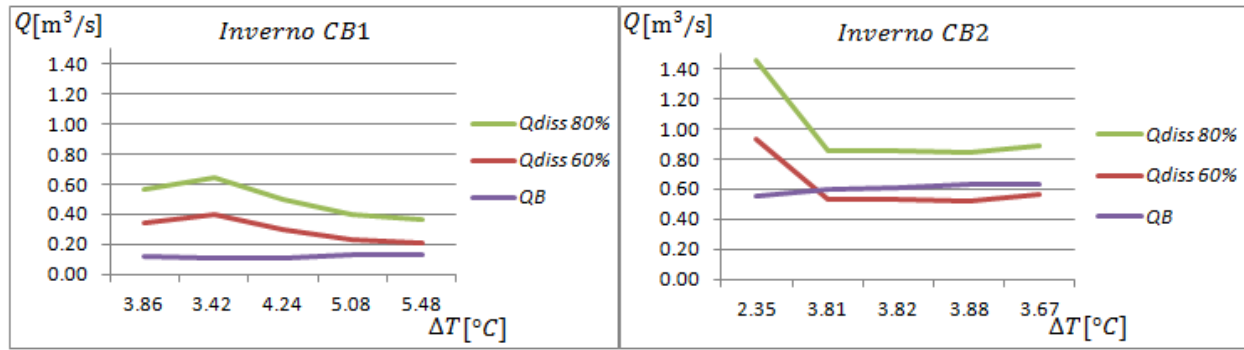
Se no CB1 com a regulação das aberturas a 80 % a ventilação tem um comportamento bom para os dois níveis de carga, no CB2 as aberturas poderiam ser fechadas em 80 % para a carga de 20 % e em 50 % para a carga de 40 %, (tabela 5.7).

Na tabela 5.5 são indicados os registos médios das temperaturas durante as mesmas semanas obtidos do CB1 e CB2 e uma simulação dos valores calculados para um aumento do regime de carga nos transformadores para 60 % e 80 %.

Tabela 5.5 Simulação para carga de 60 % e 80 %, no inverno.

<i>PT</i>	<i>DATA</i>	T_i	T_e	ΔT	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	% <i>Fecho</i>	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	% <i>Fecho</i>	Q_B	Q_{PC}
—	—	°C	°C	°C	m³/s	m²	—	m³/s	m²	—	m³/s	kW
					60%	60%	60%	80%	80%	80%		
<i>CB1</i>	140405	17.2	13.34	3.86	0.34	0.219	51.44	0.56	0.365	18.98	0.123	0.49
<i>CB1</i>	140414	21.83	18.41	3.42	0.39	0.306	31.98	0.65	0.503	-11.87	0.103	0.43
<i>CB1</i>	140421	22.66	18.42	4.24	0.30	0.211	53.13	0.50	0.357	20.76	0.113	0.54
<i>CB1</i>	140428	21.68	16.6	5.08	0.23	0.146	67.58	0.40	0.255	43.44	0.126	0.64
<i>CB1</i>	140526	21.23	15.75	5.48	0.21	0.124	72.44	0.36	0.220	51.12	0.132	0.69
<i>CB2</i>	140405	15.55	13.2	2.35	0.93	0.602	-67.20	1.45	0.937	-160.22	0.558	0.28
<i>CB2</i>	140414	21.95	18.14	3.81	0.54	0.323	10.28	0.86	0.516	-43.26	0.598	0.45
<i>CB2</i>	140421	21.35	17.53	3.82	0.53	0.317	11.90	0.85	0.506	-40.69	0.607	0.45
<i>CB2</i>	140428	19.85	15.97	3.88	0.52	0.298	17.26	0.84	0.476	-32.28	0.634	0.46
<i>CB2</i>	140526	19.11	15.44	3.67	0.56	0.321	10.83	0.89	0.511	-42.01	0.629	0.43

Graficamente obtém-se o valor do caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , conforme indicado nas figura 5.6 a) e 5.6 b).



a)

b)

Figura 5.6 a) Simulação para carga de 60 %, b) simulação para carga 80 %, no inverno.

Verifica-se que no CB1 o caudal produzido pelo efeito da ventilação natural Q_B está abaixo do caudal necessário para refrigerar o transformador. Para estes valores de carga as aberturas de ventilação podem ser reguladas em 50 % do seu valor nominal, o que satisfaz o caudal de ventilação necessário para o regime de carga do transformador a 60 % e aceitável para o regime de carga de 80 %.

No caso do CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy satisfaz o caudal necessário para a refrigeração do transformador para o regime de carga de 60 % e as aberturas podem ser fechadas em 50 %. Considerando um nível de carga do transformador de 80 % as aberturas devem permanecer no seu valor nominal, devido às perdas de calor do transformador já serem significativas.

No CB1 com a regulação das aberturas a 50 % a ventilação tem um comportamento satisfatório para os níveis de carga de 60 % e 80 %, no CB2 as aberturas podem ser fechadas em 50 % para o regime de carga de 60 %, mas devem permanecer no seu valor nominal para níveis de carga acima dos 60 %, (tabela 5.7).

5.2.5 Simulação com transformador de potência de 630 kVA no inverno

Pretende-se fazer uma análise comparativa do comportamento da ventilação entre CB1 e CB2 simulando a substituição do transformador em cada cabina por um transformador de 630 kVA, com o regime de carga do transformador com valores de 20 % até 80 %, tendo como base as condições registadas nas mesmas semanas consideradas de inverno.

Na tabela 5.6 são indicados os valores calculados dos caudais e as percentagens de fecho das aberturas de ventilação para os regimes de carga do transformador de 630 kVA com valores de 20 % até 80 %.

Tabela 5.6 Simulação com transformador de potência de 630 kVA, no inverno.

PT	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho
–	m^3/s	m^2	–	m^3/s	m^2	–	m^3/s	m^2	–	m^3/s	m^2	–
	20%	20%	20%	40%	40%	40%	60%	60%	60%	80%	80%	80%
CB1	0.26	0.171	61.20	0.44	0.286	34.92	0.74	0.479	-8.88	1.15	0.749	-70.20
CB1	0.31	0.241	45.12	0.51	0.398	9.61	0.85	0.658	-49.56	1.32	1.023	-132.39
CB1	0.23	0.163	62.90	0.39	0.279	36.69	0.66	0.471	-6.98	1.04	0.740	-68.12
CB1	0.17	0.110	74.93	0.31	0.196	55.38	0.53	0.340	22.81	0.85	0.540	-22.79
CB1	0.15	0.093	78.95	0.28	0.169	61.69	0.49	0.295	32.92	0.78	0.472	-7.36
CB2	0.51	0.329	8.59	0.80	0.518	-43.91	1.29	0.833	-131.40	1.97	1.274	-253.90
CB2	0.28	0.166	53.89	0.46	0.275	23.68	0.76	0.456	-26.68	1.18	0.710	-97.17
CB2	0.27	0.163	54.75	0.45	0.270	25.07	0.75	0.448	-24.40	1.17	0.697	-93.65
CB2	0.27	0.153	57.62	0.45	0.253	29.67	0.74	0.421	-16.93	1.16	0.656	-82.17
CB2	0.29	0.166	53.88	0.48	0.273	24.06	0.79	0.452	-25.64	1.23	0.703	-95.22

Graficamente obtém-se o valor do caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , conforme indicado nas figuras 5.7 a) e 5.7 b).

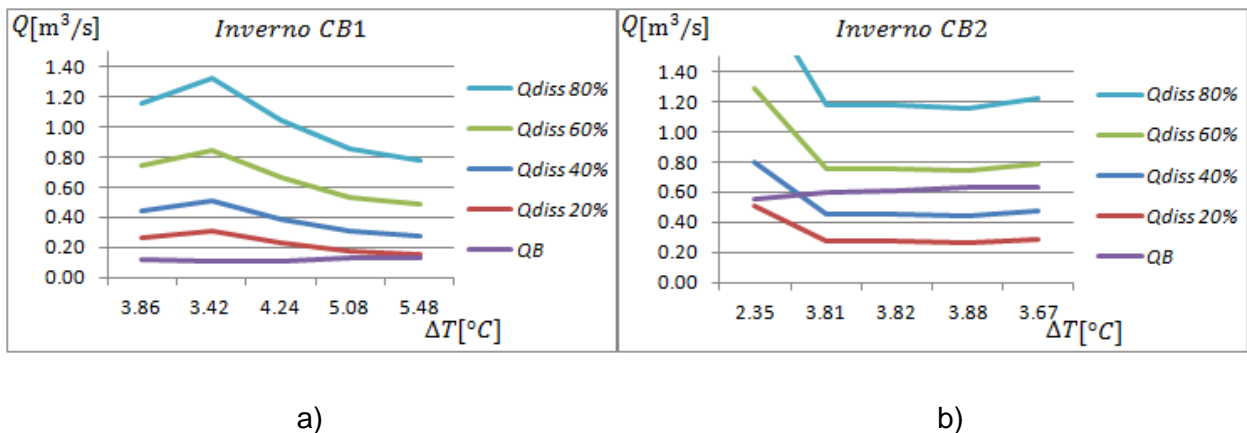


Figura 5.7 a) e b) Simulação para transformador de 630 kVA, no inverno.

No CB1 o caudal produzido pela ventilação natural Q_B está bastante abaixo do caudal necessário para refrigerar o transformador. Só é aceitável a utilização do transformador para o funcionamento com um regime de carga de 20 %, considerando as aberturas de ventilação reguladas em 80 %. Para os restantes níveis de carga, o transformador de 630 kVA não deve funcionar nas condições de regulação das aberturas no CB1.

No caso do CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy satisfaz o caudal necessário para a refrigeração do transformador para um nível de carga de 20 e 40 %, sendo aceitável para o nível de carga de 60 % com as aberturas reguladas em 50 %. Para um regime de carga do transformador de 80 % as aberturas devem permanecer no seu valor nominal.

Com a regulação das aberturas em 80 % a ventilação tem um comportamento satisfatório para o nível de carga do transformador a 20 %. Com a regulação das aberturas em 50 % o comportamento da ventilação é aceitável para um nível de carga superior aos 20 % até 60 %. Para regime de carga superiores a 60 % deve-se manter as aberturas no seu valor nominal, (tabela 5.7).

Tabela 5.7 Obstrução das aberturas em função da carga do transformador de potência, para o inverno.

Potência do TP [kVA]	≤ 160	250		> 250 a 630		
Carga do TP [%]	-	≤ 40	> 40	≤ 20	20 a 60	> 60
Valor do fecho das aberturas inverno [%]	80	80	50	80	50	-

As perdas no transformador de 630 kVA são bastante significativas e uma cabina com um transformador desta potência, atinge valores médios de temperatura no interior da cabina ligeiramente superiores aos utilizados nesta simulação.

Neste sentido, a diferença de temperatura entre o interior e exterior também aumenta o que origina um aumento do caudal produzido pelo efeito de Buoyancy.

Na tabela 5.7 foi incluído transformadores com potência menor ou igual a 160 kVA. Neste caso a potência de perdas para níveis de carga de 60 e 80 % são idênticas às perdas de um transformador de 250 kVA para um regime de carga de 40 %. As aberturas para este caso, podem ser fechadas em 80 % do valor nominal.

5.3 Análise no período de verão

5.3.1 Análise de uma semana de verão com carga real

O tratamento gráfico da informação registada no CB1 e CB2 na segunda semana de junho com sol e temperaturas altas que representa uma semana típica de verão, permite a visualização do comportamento da temperatura e humidade relativa, em conjunto com a representação da evolução do regime médio de carga do transformador, (figuras 5.8 e 5.9).

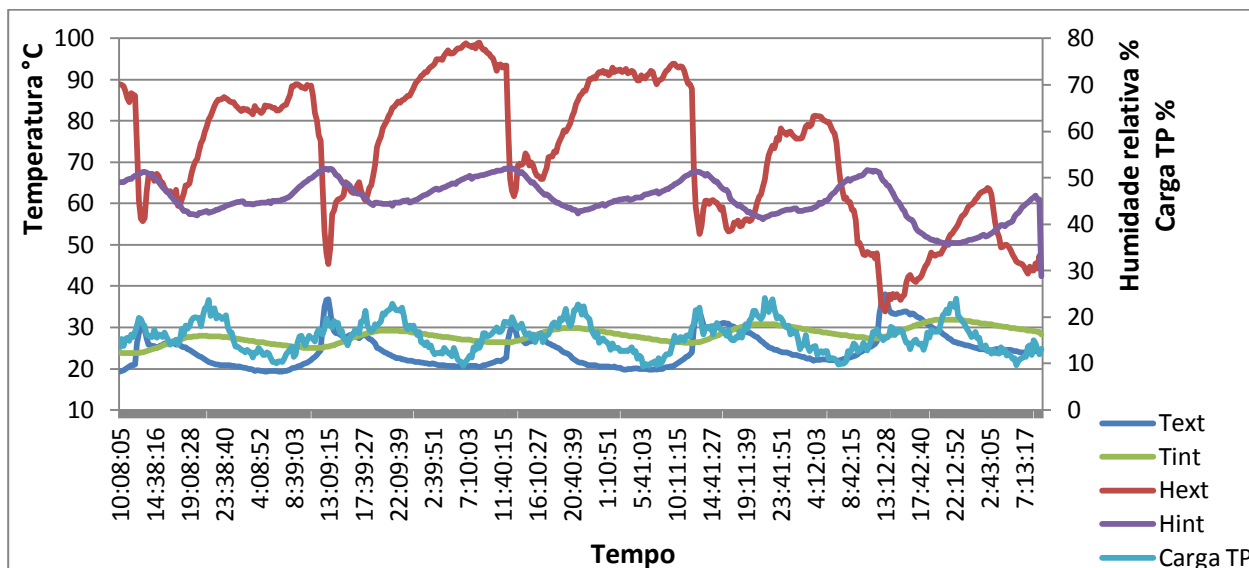


Figura 5.8 Dados obtidos do CB1 com regulação de aberturas em 80%, no verão.

Verifica-se que no CB1 com as aberturas fechadas a 80 %, a temperatura no interior varia entre os 25 e 32 °C e apresenta boa estabilidade ao longo do tempo, o que contribui para que a humidade relativa apresente valores entre os 32 e o máximo de 56 %. O valor mínimo de humidade registado no interior deve-se também a uma pequena contribuição da diminuição da humidade relativa do ar no exterior.

O regime de carga do transformador tem um valor médio de 16 % e a ponta de carga coincide com os pontos de maior temperatura registada.

No verão, os valores de humidade são baixos e a ventilação gerada com 80 % das aberturas fechadas é suficiente para realizar a refrigeração do transformador.

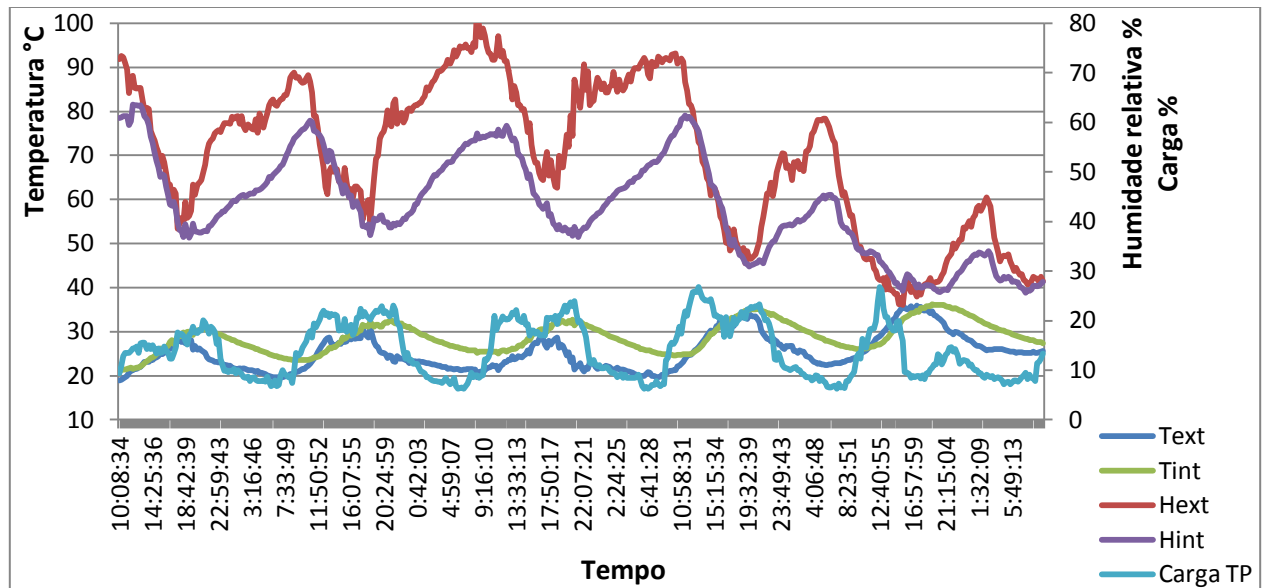


Figura 5.9 Dados obtidos do CB2 com aberturas no valor nominal, no período verão.

No CB2 com as aberturas no valor nominal, a variação da temperatura no interior apresenta uma grande oscilação com os valores a variarem entre os 22 e 36 °C.

Os picos atingidos pela temperatura no interior são influenciados pela temperatura exterior em conjunto com o regime de carga médio do transformador, que apresenta um valor de 14 %.

A humidade relativa no interior também apresenta uma maior oscilação com valores entre 26 e 63 %.

No verão, devido às aberturas estarem no valor nominal a humidade relativa e temperatura no interior da cabina tem maior oscilação e as temperaturas atingidas no interior são superiores ao caso verificado para o CB1.

5.3.2 Simulação de aumento de carga nos transformadores no verão

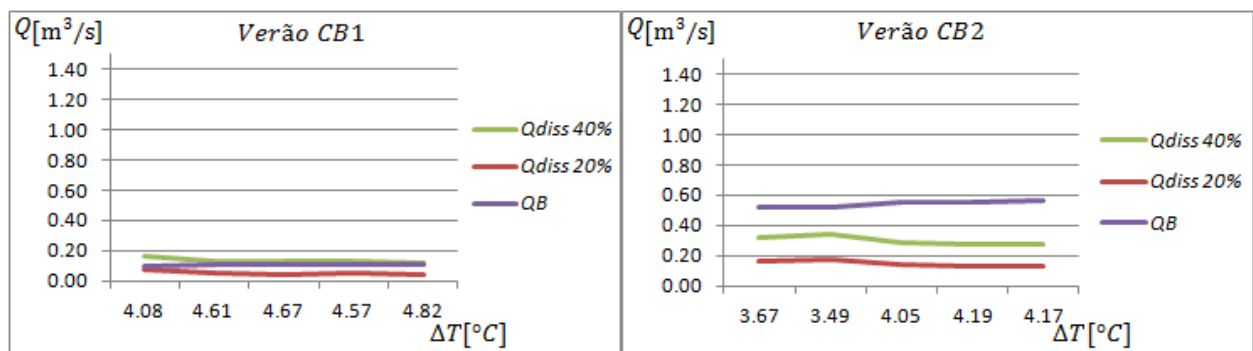
Pretende-se fazer uma análise comparativa do comportamento da ventilação entre os dois postos de transformação e realizar a simulação da subida do regime de carga dos transformadores de potência de 20 % até 80 %, tendo como base as condições reais registadas nas semanas consideradas como semanas de verão.

Na tabela 5.8 são indicados os registos médios das temperaturas durante várias semanas obtidos do CB1 e CB2, os valores calculados para a carga real de 20 % e também uma simulação dos valores para uma subida do regime de carga nos transformadores para 40 %.

Tabela 5.8 Dados da carga real a 20 % e simulação para carga de 40 %, no verão.

PT	DATA	T_i	T_e	ΔT	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	%Fecho	Q_B	Q_{PC}
—	—	°C	°C	°C	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	kW
					20%	20%	20%	40%	40%	40%		
CB1	140616	27.47	23.39	4.08	0.07	0.055	87.71	0.16	0.128	71.53	0.100	0.52
CB1	140623	27.73	23.12	4.61	0.05	0.037	91.82	0.13	0.098	78.28	0.106	0.58
CB1	140804	27.78	23.11	4.67	0.05	0.035	92.20	0.13	0.095	78.92	0.107	0.59
CB1	140811	28.65	24.08	4.57	0.05	0.039	91.41	0.13	0.101	77.47	0.104	0.58
CB1	140818	27.79	22.97	4.82	0.04	0.031	93.12	0.12	0.088	80.44	0.108	0.61
CB2	140616	27.81	24.14	3.67	0.16	0.113	68.56	0.32	0.223	37.96	0.521	0.43
CB2	140623	26.31	22.82	3.49	0.18	0.122	66.02	0.35	0.238	33.93	0.522	0.41
CB2	140804	26.78	22.73	4.05	0.14	0.090	75.09	0.28	0.183	49.19	0.558	0.48
CB2	140811	27.82	23.63	4.19	0.13	0.085	76.48	0.27	0.175	51.40	0.557	0.49
CB2	140818	26.71	22.54	4.17	0.13	0.084	76.70	0.27	0.173	51.95	0.567	0.49

A análise desta tabela com observação gráfica dos valores do caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , conforme indicado nas figuras 5.10 a) e 5.10 b).



a)

b)

Figura 5.10 a) Carga real de 20 %, b) simulação para carga de 40 %, no verão.

Verifica-se que no caso do CB1 o caudal produzido pelo efeito da ventilação natural Q_B é superior ao caudal necessário para a dissipação do calor do transformador Q_{Diss} com

regime de carga a 20 % e para um regime de carga de 40 % é aceitável manter a mesma regulação das aberturas.

No CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy é muito superior ao caudal necessário para a refrigeração do transformador, para o nível de carga de 20 e 40 % o que mostra que a capacidade de refrigeração no CB2 relativamente ao CB1 é bastante superior.

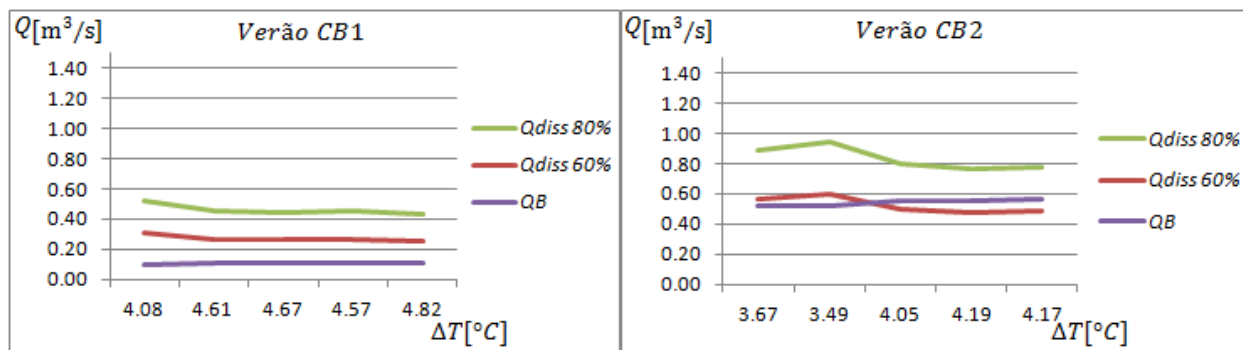
O CB1 com a regulação das aberturas em 80 % a ventilação tem um bom comportamento para os dois níveis de carga, no CB2 as aberturas poderiam ser fechadas em 80 % para o nível de carga de 20 % e em 50 % para o nível de carga de 40 %, (tabela 5.11).

Na tabela 5.9 são indicados os registos médios das temperaturas durante as mesmas semanas obtidos do CB1 e CB2 considerando a simulação dos valores para um aumento do regime de carga nos transformadores para 60 % e 80 %.

Tabela 5.9 Simulação para carga de 60 % e 80 %, no verão.

<i>PT</i>	<i>DATA</i>	T_i	T_e	ΔT	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	% <i>Fecho</i>	Q_{Diss}	$A_1 = A_2$	% <i>Fecho</i>	Q_B	Q_{PC}
—	—	°C	°C	°C	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	m ²	—	m ³ /s	kW
					60%	60%	60%	80%	80%	80%		
<i>CB1</i>	140616	27.47	23.39	4.08	0.31	0.249	44.57	0.53	0.419	6.82	0.100	0.52
<i>CB1</i>	140623	27.73	23.12	4.61	0.26	0.199	55.73	0.45	0.341	24.15	0.106	0.58
<i>CB1</i>	140804	27.78	23.11	4.67	0.26	0.195	56.77	0.45	0.334	25.77	0.107	0.59
<i>CB1</i>	140811	28.65	24.08	4.57	0.27	0.206	54.24	0.46	0.352	21.72	0.104	0.58
<i>CB1</i>	140818	27.79	22.97	4.82	0.25	0.183	59.32	0.43	0.316	29.75	0.108	0.61
<i>CB2</i>	140616	27.81	24.14	3.67	0.56	0.387	-7.57	0.89	0.617	-71.31	0.521	0.43
<i>CB2</i>	140623	26.31	22.82	3.49	0.59	0.410	-13.83	0.94	0.650	-80.68	0.522	0.41
<i>CB2</i>	140804	26.78	22.73	4.05	0.50	0.322	10.65	0.80	0.516	-43.31	0.558	0.48
<i>CB2</i>	140811	27.82	23.63	4.19	0.48	0.309	14.07	0.77	0.497	-38.19	0.557	0.49
<i>CB2</i>	140818	26.71	22.54	4.17	0.48	0.306	15.11	0.77	0.491	-36.47	0.567	0.49

Graficamente obtém-se o valor do caudal necessário para a dissipação do calor produzido pelo transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , que se encontra representado nas figuras 5.11 a) e 5.11 b).



a)

b)

Figura 5.11 a) Simulação para carga de 60 %, b) simulação para carga 80 %, no verão.

Verifica-se que no CB1 o caudal produzido pelo efeito da ventilação natural Q_B está abaixo do caudal necessário para refrigerar o transformador.

Para estes níveis de carga as aberturas de ventilação deveriam ser reguladas em 50 % do seu valor nominal, satisfazendo o caudal de ventilação necessário para os níveis de carga do transformador a 60 % e 80 %.

No CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy satisfaz o caudal necessário para a refrigeração do transformador para o regime de carga de 60 % e as aberturas podem ser fechadas em 50 %. Para um regime de carga do transformador de 80 % as aberturas devem permanecer no seu valor nominal.

No CB1 com a regulação das aberturas a 50 % a ventilação tem um comportamento satisfatório para os níveis de carga a 60 % e 80 %, no CB2 as aberturas podem ser fechadas em 50 % para o nível de carga de 60 %, mas devem permanecer no seu valor nominal para níveis de cargas superiores aos 60 %.

5.3.3 Simulação com transformador de potência de 630 kVA no verão

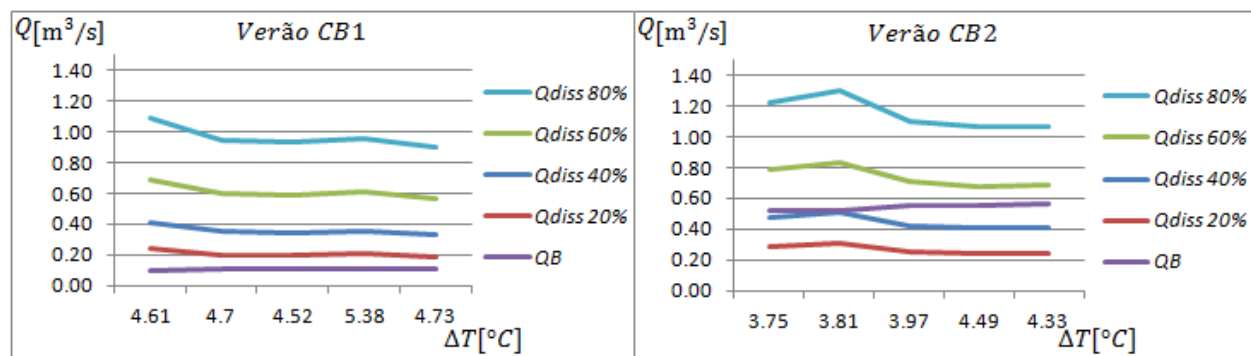
Pretende-se fazer uma análise comparativa do comportamento da ventilação entre CB1 e CB2 através da simulação da substituição do transformador em cada cabina por um transformador de 630 kVA e com o regime de carga do transformador com valores de 20 % até 80 %, tendo como base as condições registadas nas mesmas semanas consideradas de verão.

Na tabela 5.10 são indicados os valores calculados dos caudais e as percentagens de fecho das aberturas de ventilação para os regimes de carga do transformador de 630 kVA com valores de 20 % até 80 %.

Tabela 5.10 Simulação com transformador de potência de 630 kVA, no verão.

<i>PT</i>	<i>Q_{Diss}</i>	<i>A₁ = A₂</i>	% <i>Fecho</i>	<i>Q_{Diss}</i>	<i>A₁ = A₂</i>	% <i>Fecho</i>	<i>Q_{Diss}</i>	<i>A₁ = A₂</i>	% <i>Fecho</i>	<i>Q_{Diss}</i>	<i>A₁ = A₂</i>	% <i>Fecho</i>
–	m ³ /s	m ²	–	m ³ /s	m ²	–	m ³ /s	m ²	–	m ³ /s	m ²	–
	20%	20%	20%	40%	40%	40%	60%	60%	60%	80%	80%	80%
<i>CB1</i>	0.24	0.194	55.95	0.41	0.328	25.38	0.69	0.552	-25.56	1.09	0.866	-96.87
<i>CB1</i>	0.20	0.153	65.29	0.35	0.265	39.73	0.60	0.453	-2.89	0.95	0.715	-62.54
<i>CB1</i>	0.20	0.149	66.17	0.35	0.259	41.07	0.59	0.443	-0.76	0.94	0.701	-59.33
<i>CB1</i>	0.21	0.158	64.09	0.36	0.274	37.76	0.61	0.467	-6.12	0.96	0.737	-67.56
<i>CB1</i>	0.19	0.139	68.30	0.33	0.245	44.36	0.57	0.420	4.46	0.90	0.666	-51.41
<i>CB2</i>	0.29	0.200	44.36	0.48	0.330	8.39	0.79	0.546	-51.56	1.23	0.848	-135.50
<i>CB2</i>	0.31	0.214	40.64	0.51	0.350	2.91	0.84	0.576	-59.97	1.30	0.893	-148.01
<i>CB2</i>	0.25	0.163	54.61	0.42	0.273	24.16	0.71	0.456	-26.59	1.10	0.712	-97.64
<i>CB2</i>	0.24	0.156	56.64	0.41	0.262	27.15	0.68	0.439	-22.01	1.06	0.687	-90.82
<i>CB2</i>	0.24	0.154	57.13	0.41	0.259	28.02	0.68	0.434	-20.49	1.07	0.678	-88.41

Graficamente obtém-se o valor do caudal necessário para a dissipação do calor produzido pelo transformador Q_{Diss} e do caudal gerado pelo efeito de Bouyancy Q_B em função da variação de temperatura ΔT , que se encontra indicado nas figuras 5.12 a) e 5.12 b).



a)

b)

Figura 5.12 a) e b) Simulação para transformador de 630 kVA, no verão.

Verifica-se que no CB1, o caudal produzido pelo efeito da ventilação natural Q_B está abaixo do caudal necessário para refrigerar o transformador.

Só é aceitável a utilização do transformador para o funcionamento com um nível de carga de 20 %, considerando as aberturas de ventilação reguladas em 80 %. Para os restantes regimes de carga, o transformador de 630 kVA não deve funcionar nas condições de regulação das aberturas no CB1.

No caso do CB2 o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy satisfaz o caudal necessário para a refrigeração do transformador para o regime de carga de 40 % e é aceitável para o regime de carga de 60 % com as aberturas reguladas em 50 %.

Para um regime de carga do transformador de 80 % as aberturas devem permanecer no seu valor nominal.

Com a regulação das aberturas em 80 %, a ventilação tem um comportamento satisfatório para o nível de carga a 20 %.

Com a regulação das aberturas em 50 %, o comportamento da ventilação é aceitável para os níveis de carga dos 20 % até 60 %.

Para valores do regime de carga superiores a 60 %, deve-se manter as aberturas no seu valor nominal, (tabela 5.11).

Tal como descrito no ponto 5.2.5, as perdas no transformador de 630 kVA são significativas e o valor da temperatura no interior da cabina tende a aumentar ligeiramente. A diferença de temperatura entre o interior e o exterior também aumenta favorecendo o aumento do caudal produzido pelo efeito de Buoyancy.

Tabela 5.11 Obstrução das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência.

Potência do TP [kVA]	≤ 160	250		> 250 a 630		
Carga do TP [%]	-	≤ 40	> 40	≤ 20	20 a 60	> 60
Valor do fecho das aberturas inverno [%]	80	80	50	80	50	-
Valor do fecho das aberturas verão [%]	80	80	50	80	50	-

A tabela 5.11 pode ser substituída pela tabela 5.12, onde se regista uma forma prática de atuação sobre as aberturas dos postos de transformação.

Em vez de considerar a percentagem em que se pode fechar as aberturas, considera-se o valor máximo de área livre para circulação de ar em função do regime de carga do transformador. De referir que o valor da área de ventilação de 0.23 m² para as aberturas foi arredondado.

Tabela 5.12 Valor máximo da área livre das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência.

Potência do TP [kVA]	≤ 160	250		> 250 a 630		
Carga do TP [%]	-	≤ 40	> 40	≤ 20	20 a 60	> 60
Valor máximo das áreas das aberturas [m ²]	0.10	0.10	0.23	0.10	0.23	0.45

5.4 Ventilação em postos de transformação de cabina alta

Não poderia deixar de se referir uma nota breve sobre os postos de transformação de cabina alta que não estão contemplados neste estudo mais aprofundado realizado para os postos de transformação de cabina baixa.

Seguindo a mesma forma de análise realizada para os postos de transformação CB1 e CB2, as conclusões práticas são similares.

No sentido de saber quais os níveis de temperatura e humidade relativa no interior deste tipo de cabina, foi também montado um equipamento de monitorização dentro de um posto de transformação de cabina alta.

O posto de transformação de construção em alvenaria tem dimensões de base de 3.3 x 3.1 m e uma altura de 8.1 m, o que representa um volume interno total com mais um terço, quando comparado aos postos de transformação de cabina baixa.

As aberturas de ventilação estão colocadas a 0.20 m do solo e no topo da cabina a 0.60 m da cobertura, apresentando uma área média de ventilação de 0.5 m^2 em cada abertura.

Este posto de transformação de 30 kV integra no interior um transformador de potência de 250 kVA, equipamento de corte com abertura no ar e o quadro geral de baixa tensão.

O equipamento de MT apresenta um estado de degradação e corrosão avançado com vários pontos de descargas parciais e forte odor de ozono devido à ionização do ar decorrente das descargas constantes.

Neste tipo de cabina os níveis de humidade relativa registados são em média superior, aos verificados nas cabinas baixas. A degradação do equipamento é mais acelerada especialmente, se as cargas dos transformadores de potência no seu interior contarem com valores baixos.

Os dados registados mostram que no período de inverno, os níveis de humidade relativa no interior são bastante mais altos que aqueles verificados nas cabinas baixas, tendo-se registado médias de valores superiores a 80 %.

A temperatura interior apresenta oscilações com maiores amplitudes, sendo mais influenciada pela temperatura do exterior e pelo regime de carga do transformador que, apresenta um valor de carga médio de 28 %.

À semelhança do que foi realizado para os postos de transformação de cabina baixa, efetuou-se a análise e simulação de vários regimes de carga com base em dados recolhidos do equipamento de monitorização, considerando o período de inverno e de verão, que originou a construção da tabela 5.13.

Tabela 5.13 Valor de fecho das aberturas e valor máximo da área livre das aberturas em função do regime de carga do transformador de potência.

Potência do TP [kVA]	≤ 160	250		> 250 a 630		
Carga do TP [%]	-	≤ 40	> 40	≤ 20	20 a 60	> 60
Valor do fecho das aberturas [%]	80	80	80	80	80	50
Valor máximo das áreas das aberturas [m ²]	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.25

Verifica-se que devido à geometria da cabina o caudal de ar gerado pelo efeito de Buoyancy Q_B é bastante superior ao caudal de ar necessário para a dissipação do calor produzido pelo transformador Q_{Diss} . Como referido no capítulo 4 no ponto 4.3.1, quanto maior for a distancia da altura entre as aberturas de ventilação, maior é a diferença de pressão ao nível das aberturas criando um maior efeito de ventilação.

A necessidade de um maior caudal de ventilação verifica-se para a simulação com transformador de 630 kVA, onde para regimes de carga superiores a 60 % a percentagem de fecho da ventilação pode ser regulada em 50 %. Nas restantes simulações, verifica-se que as aberturas podem ser reguladas em 80 % do seu valor nominal.

5.5 Síntese

O estudo e as simulações realizadas com vários regimes de carga nos transformadores e diferentes valores de potências nominais conduziram à elaboração de tabelas, com valores parametrizados. Estas tabelas indicam qual a regulação das aberturas de ventilação, que se pode aplicar nos postos de transformação de cabina baixa e cabina alta. O conhecimento da potência instalada e do regime de carga médio de uma qualquer instalação com características idênticas às que foram analisadas podem ter uma aplicação prática e direta destas tabelas, integradas em ações de manutenção preventiva.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

6.1 Conclusões

A realização deste trabalho com base numa investigação pretendeu analisar o comportamento do equipamento de MT em postos de transformação de 30 kV, tendo em consideração o efeito da temperatura e humidade e a forma como a ventilação influencia a variação destas grandezas que originam efeitos secundários sobre os equipamentos no interior das cabinas.

Começou-se com uma descrição do enquadramento do tema e da EDP Distribuição responsável pela distribuição de energia na zona onde foi realizado o estudo. A caracterização da Direção de Rede e Clientes Tejo e em particular a Área Operacional de Leiria da EDP Distribuição contempla pontos de importante relevância, tais como, a definição da zona, o nível de investimentos realizados, a qualidade de serviço e os indicadores técnicos que mostram a dimensão da rede elétrica ao nível da distribuição e seus elementos constituintes. Neste contexto, descreve-se a caracterização dos postos de transformação e sua importância no bom funcionamento do sistema de distribuição de energia.

Os aspetos construtivos das cabinas influenciam o modo da ventilação, assim como, a orientação geográfica e as características da sua envolvente, sendo esta uma realidade que não pode ser alterada.

A análise realizada ao tipo de ventilação sob ação do vento permite concluir que a orientação, posicionamento e envolvente do posto de transformação em conjunto com a direção e velocidade do vento influenciam o modo de ventilação das cabinas, contribuindo para aumentar, diminuir ou inverter o sentido de circulação do caudal de ar no interior dos postos de transformação. De facto, este ponto está fora do controlo

efetivo, mas consegue-se reduzir a sua influência através da regulação das aberturas de ventilação.

A análise dos transformadores de potência utilizados nestas instalações permitiu perceber a forma como o calor é produzido e sintetizar em expressões analíticas necessárias para os cálculos realizados, sem esquecer o cumprimento das normas para o bom funcionamento desses equipamentos.

A forma como o calor é transmitido e a relação entre as grandezas, temperatura e humidade relativa, foram aprofundados de modo a entender como interagem e como podem variar com a ventilação natural.

O valor atingido por estas grandezas no interior da cabina tem grande influência no comportamento do equipamento de MT, especialmente quando os níveis da humidade relativa são elevados, acelerando a sua degradação e conduzindo a falhas que causam interrupções na rede de distribuição da energia.

Um dos pontos principais deste estudo é o comportamento da ventilação nos postos de transformação mediante o conhecimento do ambiente interior da cabina que envolve o equipamento de MT. Neste sentido, foi necessário construir equipamento apropriado para adquirir e armazenar informação e consequente análise entre dois postos de transformação com características similares, nos quais algumas ações de melhoria tenham sido implementadas mas onde o nível de degradação do equipamento fosse diferente por forma a perceber as causas que estão na base da degradação mais rápida do equipamento.

Foi necessário perceber os conceitos básicos da ventilação natural, entender a forma como se gera e o modo de traduzir a ventilação em expressões matemáticas que pudessem ser aplicadas neste trabalho, através de cálculos realizados no estudo mais aprofundado da ventilação dos postos de transformação.

Valores altos de humidade em conjunto com a poluição e poeiras acumuladas contribuem bastante para o aumento da frequência das descargas parciais que

produzem gases e aceleram a degradação e corrosão do equipamento no interior da cabina.

Através da relação existente entre a humidade e temperatura a uma dada pressão, a diminuição da humidade consegue-se com o aumento da temperatura e este efeito é o que se pretende atingir no interior das cabinas.

Sabendo que a fonte de calor principal no seu interior provém principalmente das perdas do transformador e que a ventilação natural tem como função retirar o calor gerado do interior da cabina, então o controle do caudal de ar consegue-se através da regulação das aberturas de ventilação, sendo este o método mais prático de manter um determinado nível de temperatura no interior da cabina com o objetivo de diminuir os níveis da humidade relativa. Esta regulação pode ser realizada pela aplicação de placas de acrílico nas aberturas de ventilação de acordo com um valor estipulado, sendo a sua aplicação simples e de baixo custo.

O estudo foi dividido em dois períodos considerados como período de inverno e de verão e constatou-se que no período de inverno quando o equipamento está sujeito a maiores níveis de humidade a velocidade de degradação é maior.

No período de verão os valores da humidade relativa são normalmente mais baixos e o problema consistia em determinar se a regulação das aberturas calculada para o período de inverno, colocava em causa a refrigeração do transformador no período de verão.

Verifica-se que a regulação das aberturas pode ser utilizada durante os dois períodos. No inverno tem a função de diminuir as oscilações de temperatura fornecendo capacidade térmica à cabina o que implica a redução dos valores de humidade.

No verão, apesar do aumento médio da temperatura no interior e exterior da cabina o diferencial entre as temperaturas é maior o que implica uma maior capacidade de ventilação que permite remover maior quantidade de calor.

Durante o período de inverno a análise do comportamento dos dois postos de transformação CB1 e CB2 mostram que, com a regulação das aberturas de ventilação

permite obter uma maior estabilidade térmica no interior da cabina, independentemente das condições climatéricas verificadas no exterior em termos de temperatura e humidade relativa. Esta estabilidade térmica é conseguida pelo aproveitamento do calor produzido pelo transformador mesmo quando o seu regime de carga tem um valor baixo, sendo assim possível atingir uma temperatura aceitável no interior da cabina.

Quando a regulação das aberturas não existe, as condições no interior da cabina do ponto de vista térmico são piores e o valor da temperatura interior atingido é baixo o que implica valores de humidade elevados. As condições no interior da cabina sofrem maior influência das variações de temperatura e humidade do exterior.

A análise dos dados sobre o total de instalações na Área Operacional em estudo mostra que, 18 % das instalações funcionam com um regime de carga médio do transformador de potência abaixo de 50 % e estas instalações, salvo se foram de alguma forma intervencionadas, estão a funcionar nas mesmas condições em que o CB2 foi analisado, com as aberturas de ventilação no valor nominal.

As simulações realizadas para diferentes níveis de carga nos transformadores com diferentes valores de potência nominal tiveram como objetivo a elaboração da tabela 5.11, na qual se pretendeu parametrizar a percentagem de fecho das aberturas de ventilação em função do regime de carga do transformador. No mesmo sentido, e do ponto de vista prático, a tabela 5.12 traduz o valor da área livre das aberturas de ventilação em função do regime de carga do transformador.

Os postos de transformação de cabina alta têm um comportamento pior que o considerado na cabina baixa, do ponto de vista da estabilidade térmica e das condições de temperatura e humidade relativa no interior. As simulações realizadas para diferentes níveis de carga nos transformadores com diferentes valores de potência nominal, deram origem à construção da tabela 5.13, na qual se parametrizou a percentagem de fecho das aberturas e a área livre das aberturas de ventilação em função do regime de carga do transformador.

A aplicação destas tabelas pode ser realizada para qualquer instalação com características idênticas às que foram analisadas e apenas implicam o conhecimento

da potência instalada nesse posto de transformação e do seu regime de carga médio de funcionamento.

Ao identificar postos de transformação com baixos regimes de carga no transformador de potência a aplicação direta destas tabelas tem grande utilidade prática e a sua implementação nos postos de transformação, pode ser integrada nas ações de manutenção preventiva.

6.2 Propostas de futuros desenvolvimentos

No sentido de desenvolver e melhorar este trabalho poderia ser realizado um estudo e análise do comportamento da ventilação em postos de transformação de cabina alta e baixa equipados com transformadores de 630 kVA, tendo como base as condições das simulações realizadas.

Verificou-se que o ideal seria conseguir um valor de temperatura com a estabilidade necessária de forma a criar no interior da cabina condições para que o equipamento atinja o seu tempo de vida útil para o qual foi projetado. Com o projeto Inovgrid da EDP Distribuição a decorrer, poderia ser analisada a possibilidade de integração da regulação automática da ventilação nos postos de transformação. Neste sentido, existe a necessidade de analisar os custos envolvidos no desenvolvimento de equipamento para regulação automática e sua manutenção.

Se a aposta for no sentido da regulação das aberturas outras possibilidades podem ser estudadas, como por exemplo, a utilização de novos produtos existentes no mercado que tem como características especiais aumentar ou diminuir o seu volume em função da variação da humidade do ar, permitindo desta forma fazer um ajuste dinâmico nas aberturas de entrada e saída de ar dos postos de transformação.

A utilização de soluções práticas e viáveis para a regulação das aberturas de ventilação pode ser realizada através do estudo da implementação de um sistema vertical de calhas nas aberturas, onde se aplicam placas de acrílico ou outro material, em que cada placa aplicada, corresponde a um valor de fecho da abertura.

O desenvolvimento de uma aplicação em sistema Android que permita aceder a uma base de dados com informações relevantes, de modo a obter o dimensionamento adequado da regulação a aplicar às aberturas de ventilação do posto de transformação previamente selecionado.

Referências bibliográficas

- [1] EDP Distribuição: “SIT-Sistema Informação Técnica”, 2014.
- [2] EDP Distribuição: “Direção de Redes e Clientes Tejo”, 2012.
- [3] EDP Distribuição: “Rede de Distribuição de Energia Elétrica”, www.edp.pt/pt/sustentabilidade/prevencaoese_seguranca2/seg_fornecedores/Pages/Rede.aspx,
acedido em 19/06/2014.
- [4] EDP Distribuição: “Postos de Transformação MT/BT de Distribuição Pública”, DMA - C13 - 910/N, 1ª Edição, Agosto 2004.
- [5] Direção Geral de Energia: “Tipo dos Postos de Transformação em Cabina Baixa do Tipo CBU e CBL”, DIT - C13 - 835, Março 1996.
- [6] ASHRAE Handbook: “Fundamentals Heating and Air Conditioning”, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc, Atlanta 2001.
- [7] Daniels, K.: “A Technical Guide for Architects and Engineers - Advanced Building Systems”, Birkhauser - Publishers for Architecture, Boston 2003.
- [8] Peel C., Finlayson B., McMahon T.: “Updated world map of Köppen-Geiger climate classification”, Hydrology and Earth System Sciences, 2007.
- [9] Climate-Data: “Clima na Marinha Grande”, <http://pt.climate-data.org/location/7018/>,
acedido em 20/03/2014.
- [10] Windfinder: “Estatísticas de vento”, http://pt.windfinder.com/windstatistics/monte_real,
acedido em 20/03/2014.
- [11] Chester, L. D.: “Tratado de Eletricidad, Corriente Alterna”, TomoII, Cuarta Edición, Editorial Gustavo Gili, Barcelona 1966.
- [12] Carvalho, J. F. S.: “Máquinas Elétricas - Transformadores”, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra 2011.
- [13] Enrique, R. O.: “Transformadores de Potencia de Medida Y de Proteccion”, 7ª Edición, Marcombo-Barcelona 1991.

- [14] <https://www.google.pt/search?q=transformadores+de+potencia&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7HTSU5mGONTn7AaXrICgDQ&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=632>,
acedido em 01/07/2014.
- [15] EFACEC: “Transformadores de distribuição herméticos em óleo”,
http://www.efacec.pt/PresentationLayer/efacec_competencias_00.aspx?idioma=1&area=2&local=46,
acedido em 12/05/2014.
- [16] Theodore B., Adrienne L., Frank I., David D.: “Introduction to Heat Transfer”, 6th Edition,
John Wiley & Sons, New York 2011.
- [17] <https://www.google.pt/search?q=transformadores+de+potencia&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=7HTSU5mGONTn7AaXrICgDQ&ved=0CB0QsAQ&biw=1280&bih=632>,
acedido em 04/07/2014.
- [18] International Standard IEC60076 - 1: “Power Transformers - Part 1 - General”, Edition 2.1,
April 1993.
- [19] International Standard IEC60076 - 2: “Power Transformers - Part 2 - Temperature Rise”,
Edition 2, April 1993.
- [20] International Standard IEC60076 - 7: “Power Transformers - Part 7 - Loading Guide for Oil
Immersed Power Transformers”, Edition 1, December 2005.
- [21] CIBSE: “Natural Ventilation in Non - domestic Buildings - Applications Manual” The
Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2005.
- [22] Heiselberg P.: “Principles of Hybrid Ventilation”, Aalborg University, Denmark. 2002.
- [23] Andersen K.: “Theory for Natural Ventilation by Thermal Buoyancy in One Zone with
Uniform Temperature”, Building and Environment, Vol. 38, 2003.
- [24] Etheridge D., Sandberg M.: “Building Ventilation - Theory and Measurement”, John Wiley
& Sons, 1996.
- [25] Yunus C., Cimbala J.: “Fluid Mechanics – Fundamentals and Applications”, McGraw Hill
2006.
- [26] Awbi H.: “Ventilation of Buildings”, Second Edition, Spon Press, London, 2003.

- [27] Orme M.: “Applicable Models for Air Infiltration and Ventilation Calculations”, International Energy Agency, Air Infiltration and Ventilation Center. AIC – TN – 51, 1999.
- [28] Siemens AG: “Power Transmission and Distribution - Transformers Division”, Order No. E500011, January 2014.
- [29] Geria J., Cristino P., Santos C., Santiago T.: “MV/LV Substations - Solutions to improve the technical quality of service”, Stockholm - CIRED, June 2013.
- [30] Varejão, S. A.: “Meteorologia e Climatologia”, Versão digital 2, Brasil 2006.
- [31] Moran J., Morgann M.: “Meteorology – Atmosphere and the science of weather”, McMillan 1989.
- [32] Lawrence M. G.: “The relationship between Relative Humidity and Dewpoint Temperature in Moist Air”, Institute for Chemistry, Mainz - Germany 2004.
- [33] Kilindjian C., Ercole F., Perrone M., Serve D.: “Environmental installation and operating conditions of MV products”, Conference publication, 2007.
- [34] Schneider Electric Industries: “Medium voltage equipment on sites exposed to high humidity or pollution”, AMTE306034, September 2010.
- [35] Schneider Electric Services: “Partial discharge monitoring technology”, 1910DB1203, April 2012.
- [36] Holtzhausen J. P.: “Model for Electrical discharge and leakage current development on high voltage insulators”, Conference publication, June 2002.
- [37] EDP Distribuição: “Postos de Transformação Pré-fabricados”, DMA - C13 - 912/N, 1ª Edição.
- [38] Merlin Gerin: “Distribuição Média Tensão, Equipamentos Pré - Fabricados”, Catálogo 2004.
- [39] Ormazabal: “Aparelhagem de Média Tensão – Distribuição Secundária”, Catálogo 2009.
- [40] International Standard IEC62271 - 1: “High voltage switchgear and control gear”, Edition 1, October 2007.

